

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

**FORMAÇÃO DE CÉLULAS DE MANUFATURA
ATRAVÉS DA METODOLOGIA BRANCH AND
BOUND**

DANILO MACCARI

Florianópolis, Dezembro de 1999

Formação de Células de Manufatura através da Metodologia Branch and Bound

DANILO MACCARI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de
Produção da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia

Orientadora: Prof^a Vera Lúcia Duarte do Valle Pereira, Dr^a.

**Florianópolis - SC
1999**

Formação de Células de Manufatura através da Metodologia Branch and Bound

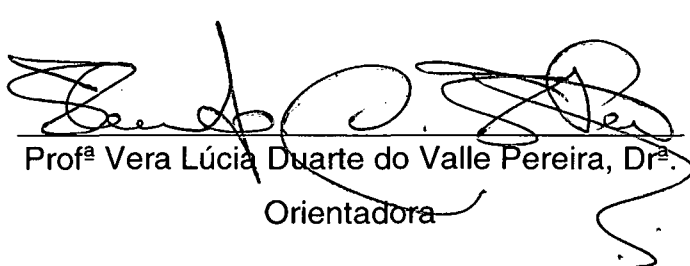
Danilo Maccari



Prof. Ricardo Miranda Bárcia, Ph.D.

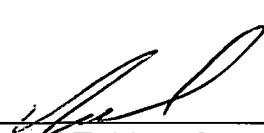
Coordenador

Banca Examinadora:



Profª Vera Lúcia Duarte do Valle Pereira, Drª.

Orientadora



Prof. Dalvio Ferrari Tubino, Dr.

Membro



Prof. Nelson Back, Ph.D

Membro

*A meus pais, **Venício e Oldina**, por toda a minha vida;*

*Aos meus irmãos, **Adonis e Sinue**, por todo o apoio e incentivo durante todos os
momentos.*

AGRADECIMENTOS

- À **Profª. Vera Lúcia D. do Valle Pereira**, por todo o incentivo à minha carreira dentro e fora da unversidade, pela orientação e todo o trabalho e revisão desta obra;
- A **Marcos Paulo Matias**, por aceitar o desafio de me auxiliar no trabalho de programação computacional;
- A todos os amigos que, direta ou indiretamente, me ajudaram a enfrentar os desafios e obstáculos durante a elaboração desta obra; em especial a **Wudson Antony Neres**;
- À **Universidade Federal de Santa Catarina**, por todos os conhecimentos adquiridos e minha formação.

A crescente concorrência no mercado mundial, juntamente com a globalização e diversificação dos produtos, tem obrigado as indústrias a abandonarem a filosofia de produção em massa, amplamente explorada nas décadas passadas e adotar sérias medidas de economia, redução de custos, qualidade de produto e flexibilidade.

Tendo em vista a importância dos tópicos acima, os administradores de empresas viram-se diante de um impasse, onde já não mais valia os tradicionais conceitos administrativos de Taylor que imperavam há décadas, obrigando-os a revolucionarem completamente as técnicas de produção, em prol da competitividade e sobrevivência.

Neste contexto, o crescente desenvolvimento tecnológico nas empresas contribuiu consideravelmente para a diversificação dos itens produzidos na indústria manufatureira, elevando a qualidade dos mesmos, reduzindo seus custos e buscando-se novos mercados.

Em face deste movimento, estudos realizados na década de 50 pelos russos conduziram à Filosofia da Tecnologia de Grupo, que explora as vantagens econômicas da similaridade entre peças fabricadas em pequenos lotes, tratando-as em conjunto como se fosse produzidas em massa.

As características de flexibilidade, redução de custos, diminuição no lead-time e maior motivação dos funcionários envolvidos, justificam a aplicação dos conceitos abordados na Tecnologia de Grupo.

Dentro desta abordagem, foi desenvolvido um sistema computacional que auxilia na formação e famílias de peças e células de máquinas, o qual ainda possibilita o balanceamento da carga de trabalho nas máquinas dentro das células, e apresentado a nível de protótipo.

The growing concurrence in the world market, joined with the globalization and product diversification have obligate the industries to abandon the mass production philosophy, explored in the past decades and adopt serious providence toward to the economy, flexibility, product quality and cost reduction.

Considering the importance of the topics above, the managers of companies will find themselves in front of an impasse, where it wouldn't has the traditional Taylor's administrative concepts which existed for decades, obligating them to revolutionize completely the production techniques, toward to the competitively and survival.

In this context, the improving in the technological development in the industries contribute considerably to the diversification of the items produced in the manufacturing industries, growing the quality, reducing the cost and looking for new markets.

Despite of this movement, researches done in the 50's by the Russians led to the Group Technology philosophy, which explores the advantages of similarities of pieces produced in small sizes, considering them in group as if produced in mass.

The features of flexibility, costs reduction, decrease of lead-times and bigger motivation of the labor justify the application of the Group Technology concepts. In this method, were developed a computational system which aid on the family pieces and machine cells formation, supplying the balancing of work charge within the cells, showed in the prototype level.

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	ii
ABSTRACT.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE EQUAÇÕES.....	viii
GLOSSÁRIO.....	ix
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	01
1.1 – OBJETIVO DA PESQUISA.....	05
1.2 – JUSTIFICATIVA.....	05
1.3 – METODOLOGIA.....	08
1.4 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	10
CAPÍTULO 2 – SISTEMAS PRODUTIVOS.....	12
2.1 – ASPECTOS HISTÓRICOS.....	12
2.2 - A DECISÃO DE IMPLEMENTAR TG PELAS INDÚSTRIAS.....	13
2.3 – ANÁLISE DOS PRINCIPAIS SISTEMAS PRODUTIVOS.....	17
2.3.1 – LAYOUT EM LINHA.....	17
2.3.2 – LAYOUT DE POSIÇÃO FIXA.....	20
2.3.3 – LAYOUT FUNCIONAL.....	21
2.3.4 – LAYOUT EM GRUPO.....	24
2.4 – MÉTODOS DE FORMAÇÃO DE FAMÍLIA	27
2.4.1 – INSPEÇÃO VISUAL.....	28
2.4.2 – CLASSIFICAÇÃO E CODIFICAÇÃO.....	28
2.4.2.1 – TIPOS DE ESTRUTURA DE UM CÓDIGO	30
2.4.2.2 – SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO E CODIFICAÇÃO.....	32
2.4.3 – ANÁLISE DO FLUXO DE PRODUÇÃO.....	35
2.5 – MÉTODOS DE FORMAÇÃO DE FAMÍLIA	37

CAPÍTULO 3 - MÉTODOS DE FORMAÇÃO DE CÉLULAS SEGUNDO ANÁLISE DO FLUXO DE PRODUÇÃO.....	38
3.1 – AGRUPAMENTOS BASEADOS NA ORDENAÇÃO VETORIAL.....	39
3.1.1 – RANK ORDER CLUSTERING (ROC).....	39
3.1.2 – DIRECT CLUSTERING ANALYSIS –DCA.....	42
3.1.3 – BOND ENERGY ANALYSIS (BEA).....	44
3.2 – MÉTODOS BASEADOS EM AGRUPAMENTOS HIERÁRQUICOS.....	47
3.2.1 – SINGLE LINKAGE CLUSTER (SLINK).....	48
3.2.2 – AVERAGE LINKAGE CLUSTER	51
3.3 – MÉTODOS HEURÍSTICOS.....	51
3.3.1 – S A	52
3.3.2 – FACT.....	54
3.3.3 – TRUNCATED TREE SEARCH.....	54
3.3.4 – BRANCH AND BOUND.....	57
3.4 – CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	57
 CAPÍTULO 4 – A METODOLOGIA BRANCH AND BOUND.....	 58
4.2 – VARIÁVEIS UTILIZADAS NO ALGORITMO.....	59
4.3 – O ALGORITMO.....	61
4.4 – EXEMPLO GENÉRICO.....	64
4.4.1 – DADOS DE ENTRADA.....	64
4.4.2 – PROCEDIMENTO.....	67
4.4.3 – RESULTADO MATRICIAL.....	72
4.4 – CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	73
 CAPÍTULO 5 – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	 74
5.1 – MÓDULO DE CADASTRAMENTO.....	74
5.1.1 – MODULO DE CADASTRAMENTO DE SIMULAÇÕES.....	74
5.1.2 – MODULO MÁQUINAS E PEÇAS A PROCESSAR.....	74
5.1.3 – MODULO TEMPO DISPONÍVEL NAS MÁQUINAS.....	75
5.2 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO.....	75

5.3 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS..... 75

5.4 – CONCLUSÃO DO CAPÍTULO..... 85

CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DE RESULTADOS..... 86

6.1 – ÍNDICES DE DESEMPENHO..... 87

6.2 – EXEMPLO ILUSTRATIVO..... 90

 6.2.1. – EXEMPLO 1..... 90

 6.2.2 – EXEMPLO 2..... 94

 6.2.3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS..... 101

 6.2.3.1 – PORCENTAGEM DE ELEMENTOS EXCEPCIONAIS..... 101

 6.2.3.2 – MEDIDA DE EFETIVIDADE..... 104

 6.2.3.3 – UTILIZAÇÃO DE MÁQUINAS E EF. DE AGRUPAMENTOS 107

6.3 – CONCLUSÃO DO CAPÍTULO..... 109

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES FINAIS..... 110

 7.1 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 111

 7.2 – CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 112

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 115

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1: A produção em lotes no universo da manufatura.....	2
FIGURA 1.2: Metodologia de desenvolvimento do trabalho.....	9
FIGURA 2.1: Funções operacionais e Staff afetadas pela Tecnologia de Grupo	14
FIGURA 2.2: Etapas para a implementação da manufatura celular.....	15
FIGURA 2.3: Representação do Layout em Linha.....	17
FIGURA 2.4: Sistema Flexível de Manufatura.....	19
FIGURA 2.5: Sistema Flexível de Manufatura.....	19
FIGURA 2.6: Linha de produção de aviões.....	20
FIGURA 2.7: Layout Funcional.....	22
FIGURA 2.8: Tempos Totais de Produção.....	22
FIGURA 2.9: Diversificação de produtos exemplificado pelo ciclo de vida.....	23
FIGURA 2.10: Layout organizado por processo.....	24
FIGURA 2.11: Conversão de um sistema tradicional <i>job-shop</i> em cel. de manufatura...	25
FIGURA 2.12: Sistemas de fabricação x volume e variedade de peças.....	25
FIGURA 2.13: Similaridade nos processos de Fabricação.....	27
FIGURA 2.14: Proliferação de desenhos de componentes em contrapartida à novas formas distintas.....	29
FIGURA 2.15: Uma estrutura monocódigo.....	30
FIGURA 2.16: Matriz de fluxo peça – máquina.....	31
FIGURA 2.17: Código para as máquinas.....	31
FIGURA 2.18: Código para o processo.....	32
FIGURA 2.19: Exemplo de sistema de codificação de uma família de peças.....	33
FIGURA 2.20: Código de campo para uma determinada peça.....	34
FIGURA 2.21: Sistema de codificação para um determinado conjunto de peças.....	34
FIGURA 2.22: Peças encontradas dentro de uma determinada família.....	35
FIGURA 2.23: Ilustração de um Layout funcional.....	35
FIGURA 2.24: Ilustração de um Layout baseado em células de manufatura, no qual o escoamento de material é eficiente.....	36
FIGURA 2.25: Representação matricial de células.....	37
FIGURA 3.1: Fluxograma para o método Rank Order Clustering - R.O.C.....	40
FIGURA 3.2: Matriz com ponderação nas linhas.....	41
FIGURA 3.3: Matriz com ponderação nas colunas.....	41
FIGURA 3.4: Matriz com linhas e colunas ordenadas.....	42

FIGURA 3.5: Fluxograma para o método Direct Clustering Analysis - DCA.....	43
FIGURA 3.6: Ordenação de linha e colunas através do método Direct Clustering Analysis; ponderação de linhas colunas.....	43
FIGURA 3.7: Fluxograma para o método Bond Energy Analysis - BEA	46
FIGURA 3.8: Valores de efetividade	47
FIGURA 3.9: Matriz peça-máquina.....	48
FIGURA 3.10: Matriz de coeficientes de sim. correspondente à matriz da fig. 2.30.....	49
FIGURA 3.11: Dendograma.....	50
FIGURA 3.12: Exemplo de pesquisa de nós.....	55
FIGURA 4.1: Matriz de incidência.....	63
FIGURA 4.2: Matriz de tempos de processamento.....	65
FIGURA 4.3: Matriz de tempos de setup.....	65
FIGURA 4.4: Matriz de tempos disponíveis nas máquinas.....	65
FIGURA 4.5: Diagrama de redes para a primeira célula.....	70
FIGURA 4.6: Diagrama de redes para a segunda célula.....	69
FIGURA 4.7: Diagrama de redes para a terceira célula.....	72
FIGURA 4.8: Matriz resultante.....	73
FIGURA 5.1: Fluxograma para formação de células e balanceamento.....	76
FIGURA 5.2: Menu principal.....	77
FIGURA 5.3: Banco de dados para cadastramento de simulações.....	78
FIGURA 5.4: Cadastro de simulações.....	79
FIGURA 5.5: Designação de peças às máquina, tempos de processamento, setup e quantidade de peças.....	79
FIGURA 5.6: Banco de dados em forma de planilha.....	80
FIGURA 5.7: Cadastramento de totais de processamento para as máquinas.....	80
FIGURA 5.8: Comandos do menu principal e execução da simulação.....	81
FIGURA 5.9: Seleção da forma de saída dos resultados.....	82
FIGURA 5.10: Matriz resultante.....	83
FIGURA 6.1: Índices de desempenho.....	88
FIGURA 6.2: Matriz de Incidência para o Exemplo 1.....	92
FIGURA 6.3: Matriz ordenada para o Exemplo 1 segundo Su	93
FIGURA 6.4: Arranjo das células para o layout fabril.....	93
FIGURA 6.5: Matriz ordenada para o método Branch and Bound.....	94
FIGURA 6.6: Arranjo para o layout fabril do Exemplo 1 seg. o método B. and Bound.....	95
FIGURA 6.7: Matriz de incidência para o exemplo 2.....	95
FIGURA 6.8: Matriz ordenada para o exemplo 2 segundo método FACT.....	96

FIGURA 6.9: Arranjo das células para o layout do ex.. 2 segundo o método FACT..... 96

FIGURA 6.10: Arranjo para o layout fabril do ex. 2 segundo o método FACT..... 97

FIGURA 6.11: Arranjo das células do ex. 2 segundo o método Branch and Bound..... 98

FIGURA 6.12: Avaliação de agrupamentos segundo parâmetros operacionais..... 100

FIGURA 6.13: Deslocamento da peça processada à outra célula..... 102

FIGURA 6.14: Redução de movimentos intercelulares..... 102

FIGURA 6.15: Processo de inspeção centralizada..... 103

FIGURA 6.16: Descentralização do posto operativo e multifuncionalidade..... 104

FIGURA 6.17: Célula nº 1 da matriz ordenada do Exemplo 2 segundo o método FACT 105

FIGURA 6.18: Distribuição de tempos de máquinas no regime de produção..... 107

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1: Principais métodos encontrados na literatura..... 38

TABELA 3.2: Índices e coeficientes de similaridade..... 49

TABELA 5.1: Arquivo Log dos Cálculos..... 83

TABELA 6.1: Roteiros, tempos nas máquinas e tempos de execução e setup..... 91

TABELA 6.2: Relação de tempos disponíveis nas máquinas..... 91

TABELA 6.3: Resultados de Desempenho para o Exemplo 1..... 100

TABELA 6.4: Resultados de Desempenho para o Exemplo 2..... 100

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 3.1: Resultado para a soma de pot. da 1ª linha da matriz da figura 3.1.....	40
EQUAÇÃO 3.2: Medida de Efetividade.....	45
EQUAÇÃO 3.3: Coeficiente de Similaridade de Jaccad.....	48
EQUAÇÃO 3.4: Número de peças que requerem apenas uma máquina – U.....	49
EQUAÇÃO 3.5: Coeficiente de Similaridade $S(ij,k)$	49
EQUAÇÃO 3.6: Coeficiente de Similaridade para o método ALCA.....	51
EQUAÇÃO 3.7: Mínima distância entre o nó origem e o nó meta.....	56
EQUAÇÃO 3.8: Mínima distância entre o nó avaliado e o nó meta.....	56
EQUAÇÃO 3.9: Mínima distância entre o nó origem e o nó avaliado.....	56
EQUAÇÃO 3.10: Restrição do número de máquinas G_k em cada célula k	56
EQUAÇÃO 3.11: Restrição de cada máquina ser designada para apenas uma célula...	56
EQUAÇÃO 3.12: Restrição de integridade do modelo.....	56
EQUAÇÃO 3.13: Distância Hamming.....	56
EQUAÇÃO 3.14: Modelo matemático de alocação de peças às famílias.....	57
EQUAÇÃO 4.1: Número de peças processadas na máquina j	59
EQUAÇÃO 4.2: Critério de adição de uma nova máquina.....	60
EQUAÇÃO 4.3: Tempo ideal de cada máquina I_{jk}	61
EQUAÇÃO 6.1: Razão de Utilização de Máquinas - MU.....	89
EQUAÇÃO 6.2: Eficiência de Agrupamento - GE.....	90

ALCA	Average Linkage Cluster
BEA	Bond Energy Analysis
CAPP	<i>Computer Aided Process Planing</i> – Sistema de planejamento auxiliado por computador
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> – Manufatura auxiliada por computador
DCA	Direct Clustering Analysis
FACT	Fuzzy art with Add Clustering Technique
FLOW-SHOP	Sistema de produção contínuo
JOB – SHOP	Sistema de produção em lotes
LEAD TIME	Tempo total de produção de uma determinada peça
PERA	<i>Production Engineering Research Association</i> – Associação de Pesquisa de Engenharia de Produção
ROC	Rank Order Clustering
S A	Simulated Annealing
SLINK	Single Linkage Clustering
TG	Tecnologia de Grupo
WIP	<i>Work in Process</i> - materiais em processo

1.1 ASPECTOS GERAIS

A produtividade e a pressão internacional têm se tornado questões cada vez mais importantes para empresas industriais, que se defrontam com grandes problemas como adaptar suas linhas de produção à tecnologia de ponta existente, adoção de modernas filosofias de organização da produção e níveis de flexibilização compatíveis com a concorrência. A crescente exigência do consumidor por uma maior variedade de produtos com maior qualidade, tem imposto limites ao ciclo de vida dos produtos, onde o aprimoramento e a atualização tecnológica são regras a todas as indústrias que desejam conquistar seu espaço no mercado .

Diante disto, engenheiros e especialistas têm se esforçado incessantemente neste sentido, buscando novas formas de reduzir custos nas linhas de produção, priorizando processos produtivos que atendam à eficiência e rapidez, racionalizando recursos disponíveis e automatizando sistemas de manufatura. Os tradicionais conceitos de organização da manufatura já não mais atendiam à crescente concorrência e competitividade no mercado, onde a filosofia de produção em massa garantia lucros às instituições independentemente da qualidade dos produtos manufaturados.

De acordo com Black (1998), mudanças significativas estão acontecendo no projeto de sistemas de manufatura, motivadas pelas seguintes tendências:

1. O aumento do número e variedade de produtos continuará, resultando numa queda da quantidade (tamanho do lote) conforme a variedade aumente;
2. Solicitações para menores tolerâncias (mais exatidão e precisão produzindo melhor qualidade) continuarão a aumentar;
3. O aumento na variedade de materiais, materiais complexos com propriedades extremamente diversas causará posterior proliferação do número de processos de fabricação;

- 4. O custos dos materiais, incluindo movimentação de materiais e energia continuará sendo a parte principal do custo total do produto e a mão de obra direta representará apenas de 5 a 10% do total e continuará a diminuir;
- 5. A confiabilidade do produto aumentará em resposta ao número excessivo de ações de responsabilidade pelos produtos;
- 6. O tempo entre a concepção do projeto e o produto fabricado será reduzido através dos esforços de engenharia simultânea;
- 7. Mercados globais serão alimentados por produtos globais.

Com o aumento da gama de produtos, as empresas tornaram-se obrigadas à flexibilizar suas linhas de modo à atender o melhor possível ao mercado consumidor. Oscilações na demanda e uma grande variedade de produtos fabricados impuseram a fabricação em pequenos lotes, inviabilizando a automatização nos moldes tradicionais. Segundo Lorini (1990), a crescente tendência mundial de fabricação de lotes cada vez menores nas indústrias é consequência dos menores ciclos de vida dos produtos, inviabilidade de se manterem grandes estoques, risco de obsolescência dos mesmos. Em países industrializados, cerca de 30% do produto interno bruto é representado por produtos industrializados, sendo que destes, 40% são produzidos em lotes. Ainda, desta parcela, 75% são considerados em lotes pequenos ou médios, de acordo com a figura 1.1.

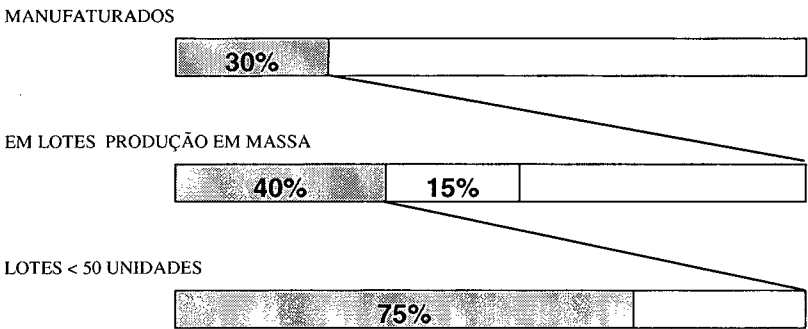


Figura 1.1: Produção em lotes no universo da manufatura
(Fonte: Lorini, 1990)

Portanto, torna-se evidente o grande problema com que as empresas se deparam ao reduzir os estoques de fabricação, onde a programação de produção

empurrada, deficiências na confiabilidade de informações técnicas, excesso de tempos em operações improdutivas e gargalos de produção, tornam-se sérios obstáculos.

Para solucionar estes problemas, tornou-se imperativo buscar-se técnicas gerenciais aliadas à uma possível automatização, para que o planejamento de produção conduza à uma produção de pequenos lotes a eficiência necessária para manter-se no mercado com competitividade de custos e qualidade. Uma nova filosofia que vem sendo utilizada com sucesso para contornar grande parte destas dificuldades na área de manufatura é a Tecnologia de Grupo (TG) .

Na TG, aplicada à manufatura, que é uma filosofia para o gerenciamento da produção, procura-se obter vantagens econômicas da similaridade de peças fabricadas em pequenos lotes, tratando-as em conjunto, como se fosse produção em massa, onde agrupa-se peças componentes do projeto ou de seqüências de manufatura similares em famílias. As máquinas podem ser então reunidas em grupos ou células (células de manufatura) para processarem uma família. A disposição das máquinas na célula define a seqüência de manufatura. Um outro objetivo é fornecer suporte gerencial para que os relacionamentos interpessoais entre trabalhadores e supervisores possam ser incrementados. Embora o termo *Tecnologia de Grupo* não seja recente, seu reconhecimento, aceitação e aplicação está rapidamente crescendo nos últimos anos devido à necessidade das indústrias de encontrarem alternativas em face a grandes pressões econômicas. Ainda assim, tem sido observada uma grande evolução e fusão destes métodos nos últimos anos.

Em um arranjo fabril, a TG oferece soluções para a reorganização do sistema funcional. Um grande número de técnicas de organizações industriais associadas com a TG têm sido postas em práticas em companhias emergentes nos Estados Unidos por muitos anos. A tabela 1.1 mostra uma pequena amostra de grandes empresas que adotaram a filosofia da TG em suas linhas.(DeVries, 1976)

Tabela 1.1: Amostra de algumas empresas que implantaram TG em suas linhas

<i>Empresa</i>	<i>Área de atuação</i>
Allis Chalmers (USA)	Equipamentos industriais e farmacêuticos
Ar-Dee Manufacturing (USA)	Componentes para máquinas
Black & Decker (USA)	Componentes para motores
Boeing (USA)	Aviação
Caterpillar Tractor Co. (USA)	Tratores
Eaton Co. (USA)	Componentes para transmissão hidrostática
Houdaille - Universal Div. (USA)	Ferramentas
Ingersoll-Rand (USA)	Componentes para motores
Langston (USA)	Componentes para ind. Papeleira
Pitney Bowes	Equipamentos para indústria papeleira
Rexnord (USA)	Componentes para máquinas
F. L. Smithe Machine Co. (USA)	Componentes de máquinas p/ embalagens
Sundstrand (USA)	Centros de processamento
TRW Inc. (USA)	Corpo de válvulas
Weil Pump Co. (USA)	Bombas Centrífugas
Ferrodo (UK)	Produtos de fricção
Ferranti (UK)	Componentes eletrônicos
Herbert Machine Tools, Ltd. (UK)	Ferramentas
National Cash Register (UK)	Componentes p/ gerenciamento de máquinas
Nelco Co. (UK)	Comp. Elétricos para motores
Serk Audco (UK)	Atuadores e válvulas
Wildt Mellor Bromley Ltd.	Cames
Jeumont (France)	Equipamentos elétricos

Fonte: DeVries, 1976

No Brasil, várias empresas já utilizam a Tecnologia de Grupo como filosofia de gerenciamento de produção, cujos conceitos são divulgados desde a década de 70. Entre as empresas, destacam-se a METAL LEVE, EMBRAER (Empresa Brasileira de Aeronáutica), FORD, MARCOPOLLO, PHILIPS, CLARK, VILARES e EMBRACO (Empresa Brasileira de Compressores). Entre as universidades que possuem linhas de pesquisas na área, destacam-se a UNICAMP, UFSCAR, e USP. A Universidade Federal de Santa Catarina mantém estudos na área através do GRUCON (Grupo de Pesquisa e Treinamento em Comando Numérico e Automatização Industrial).

1.2 OBJETIVO DA PESQUISA

Aplicar os conceitos da Tecnologia de Grupo aos processos produtivos industriais, através de um modelo computacional de arranjo de máquinas e peças capaz de formar células de manufatura e balanceá-las. O modelo embasa-se na Análise do Fluxo de Produção e é complementado com informações relativas aos parâmetros de produção, tais como tempos e volumes de produção, definidos para o ambiente.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Analisando-se a Filosofia de Tecnologia de Grupo de um modo mais amplo, pode-se encontrar inúmeros benefícios a curto prazo, obtidos quando aplicada num ambiente produtivo, entre os quais podem ser citados:

- Viabilização da produção de pequenos lotes;
- Ausência ou minimização dos estoques intermediários;
- Simplificação do planejamento do processo;
- Racionalização do programa de produção;
- Melhor acesso e precisão das informações;
- Significativa economia de custos e produção.

A longo prazo, um dos aspectos de maior importância da Tecnologia de Grupo é que, além de fornecer meios essenciais para uma maior produtividade, quando adotado numa organização industrial, estabelece bases necessárias para a implementação da fabricação assistida por computador.

Tipicamente, mudanças nos métodos de produção são justificadas em termos de benefícios econômicos expressos através de retorno do investimento. As vantagens da Tecnologia de Grupo são geralmente registradas em termos de reduções dos tempos de produção, e reduções no WIP (*Work in Process* - materiais em processo). Somado a estes benefícios, podem-se citar algumas áreas específicas onde a Tecnologia de Grupo é aplicada:

A- *Planejamento do Processo*: conjuntamente com um sistema de Classificação e Codificação pode-se criar e recuperar mais rapidamente, e reduzir os planos de fabricação, formar células e famílias de peças, aumentar a padronização de operações, seqüências de fabricação, ferramentas, etc. Todas estas vantagens podem ser melhor exploradas quando da utilização de um sistema de planejamento auxiliado por computador - CAPP (Computer Aided Process Planning) em conjunto com a Tecnologia de Grupo.

B- *Projeto de Peças*: De forma similar ao Planejamento do Processo, através de um sistema de classificação e codificação, a Tecnologia de Grupo mostra-se eficiente na criação e recuperação de peças e, conseqüentemente na padronização das mesmas, visando assim facilitar a fabricação. Isto vem a contribuir na padronização do projeto e evita a proliferação de novos desenhos, iguais ou quase iguais aos já existentes.

C- *Planejamento e Controle de Produção*: A agrupamento de máquinas em células reduz o número de centros de produção. Sendo assim, controle de um lote de peças passa a estar em uma célula e não mais espalhado em uma fábrica.

D-Preparação de Máquinas e Ferramentas: O agrupamento de peças com características similares de fabricação permite uma redução considerável nos tempos de preparação de máquinas-ferramenta. Isto se mostra de forma mais eficiente na produção de pequenos e médios lotes onde, em conseqüência do tipo de lay-out funcional apresentam altos estoques, altos tempos de preparação e baixíssima produtividade (não mais que 5% corresponde ao corte de material). Com base neste agrupamento, pode-se então transformar o "layout funcional" em celular, obtendo-se assim algumas das vantagens citadas anteriormente, como melhoria na qualidade, facilidade na movimentação de materiais, redução nos tempos de preparação e dos estoques intermediários.

E-Satisfação dos trabalhadores: A filosofia de trabalho dentro de uma célula de manufatura é representada pelo espírito de equipe entre todos os trabalhadores, onde o auto-gerenciamento dos integrantes abandona a individualização do trabalho, e permite que cada elemento trabalhe tendo em vista o benefício global do grupo. Além disso, a polivalência e multifuncionalidade aumentará a satisfação como um todo, pois o trabalho diversificará, muitas tarefas antes individuais serão executadas pela equipe como um todo, e o conhecimento adquirido por cada trabalhador aumentará.

A Tecnologia de Grupo, como uma filosofia de produção que explora as similaridades de projeto entre peças para o desenvolvimento de um novo arranjo fabril, vem de encontro aos objetivos do estilo participativo de trabalho através do conceito de células de manufatura. A idéia de formação de células de manufatura viabiliza um novo e eficaz conceito de trabalho que traduz a valorização das necessidades do indivíduo como um elemento vital na organização. Dentro de uma célula de manufatura é possível criar uma unidade administrativa própria, onde todos os integrantes teriam liberdade para tomar decisões visando a manutenção dos índices de produtividade. O envolvimento de todos os funcionários na administração do centro reflete a evolução no gerenciamento participativo da empresa, descentralizando e delegando ao funcionário o poder de tomada de decisão, criando um ambiente de trabalho em equipe, permitindo a polivalência do trabalhador e tornando-o vital para o desempenho global da organização. Os princípios da Tecnologia de Grupo contribuem para o aprimoramento das condições físicas e psicológicas do funcionário em seu posto de trabalho. O estabelecimento de células, também podendo ser chamadas de Unidades Gerenciais, contribuem na substituição do trabalho repetitivo, da fadiga e da pressão psicológica sobre o trabalhador pelo trabalho multifuncional, o qual definirá suas próprias metas de produtividade. Técnicas adicionais de produtividade, como gincanas e prêmios por desempenho poderão ser ferramentas úteis no estímulo a novas potencialidades. Assim, o funcionário tendo consciência de que é uma peça fundamental no desempenho da

empresa, demonstrará sua satisfação através do aumento na sua produtividade, e o elo entre o desenvolvimento tecnológico e aspecto social foi consolidado. Evidentemente, os controles continuarão existindo. Mas, em vez de se controlar individualmente cada trabalhador, eles serão direcionados para aspectos mais globais da produção e qualidade. Esta mudança trouxe mais liberdade e responsabilidade aos trabalhadores, dando oportunidades de manifestação dos talentos pessoais de cada um. Assim, os resultados globais podem ser melhores que no estilo taylorista, onde a gerência permanecia centralizada e os detalhes eram rigorosamente controlados.

Outras áreas: A Tecnologia de Grupo pode ser aplicada também na área de compras, visando uma padronização maior em relação às matérias-primas das peças a serem fabricadas. Muitas vezes matérias-primas de diferentes dimensões ou tipos são requisitadas para peças basicamente semelhantes. Evitando-se isto, volumes maiores poderão ser comprados reduzindo o preço. Na área de vendas, ocorrerá um aumento da velocidade de orçamentação devido à rápida recuperação das informações pelas características comuns das peças.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada consistirá na análise do fluxo de produção de um sistema fabril caracterizado pela produção de uma quantidade pré-definida de elementos discretos, ou peças, o qual fornecerá subsídios para a elaboração de um modelo matemático inicial representante do arranjo. De posse da situação inicial, será aplicada ao modelo inicial um dos métodos de formação de família peça-máquina, minimizando a duplicação de máquinas ou postos operativos em um ambiente fabril pelo aumento de sua utilização, minimizando a movimentação de materiais, simplificando os problemas de programação e aumentando a flexibilidade das células de manufatura. A figura 1.2 mostra a metodologia envolvida no desenvolvimento do trabalho.

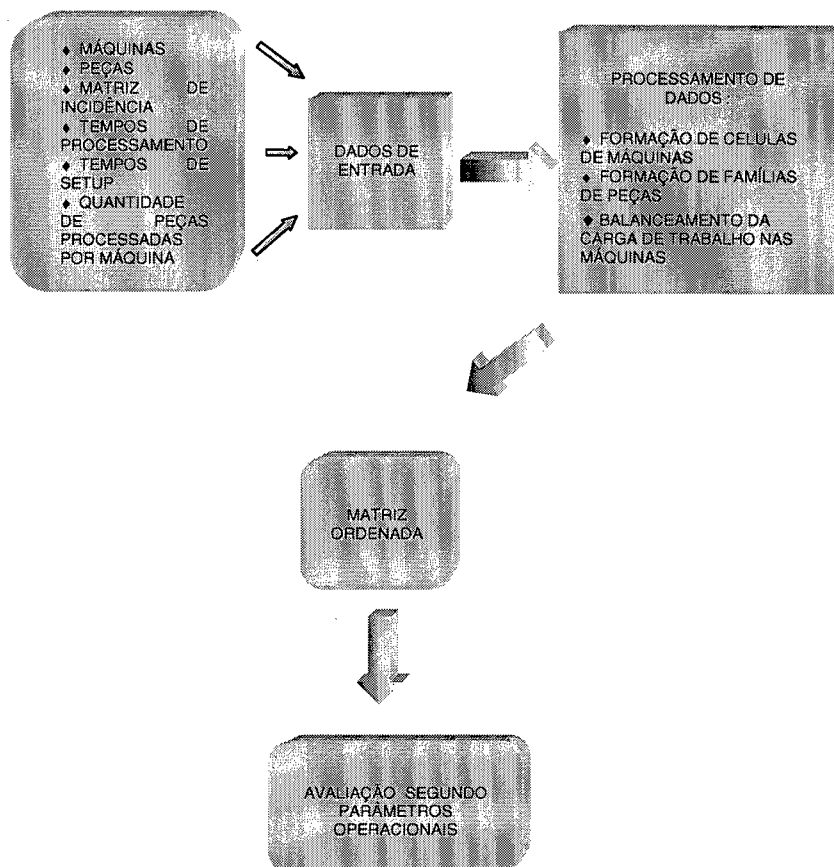


Figura 1.2: Metodologia de desenvolvimento do trabalho

Portanto, será apresentado neste trabalho um programa, o qual está dividido em dois passos. O primeiro passo será a implementação do algoritmo de formação de famílias peça-máquina – “Branch and Bound” o qual fornecerá as ferramentas necessárias para o projeto da célula. O segundo passo será o balanceamento da carga de trabalho entre células, incrementando a utilização dos funcionários/operadores ou máquinas. O problema de operadores/máquinas excessivos, bem como sua utilização e balanceamento da carga de trabalho será resolvido dentro de cada célula. Assim o desempenho das células poderá ser aumentado pela transferência da carga de trabalho de um gargalo (posto operativo ou máquina) em uma célula para outro posto operativo em outra célula, formando com isto um sistema flexível. O problema de programação de cada célula poderá ser reduzido pela consideração da programação de cada família de

peças. Para tanto, métodos de formação de famílias peça - máquina serão analisados, implementados e avaliados segundo parâmetros operacionais.

A metodologia proposta neste trabalho empregará a análise de rede para a formação de células de máquinas e famílias de peças. O método é baseado na escolha de uma máquina inicial como ponto de partida para a formação de uma rede. Selecionar uma máquina origem com o menor número de tarefas a executar auxiliará na redução do tamanho da rede de pesquisa e na obtenção de mais soluções alternativas. O algoritmo determinará a configuração de máquinas candidatas à duplicação, tanto devido à falta de capacidade de estas processar as tarefas como pela caracterização de um gargalo no processo produtivo.

Portanto, utilizar-se-á a técnica Branch and Bound, que é um método genérico aplicado a vários problemas de otimização. Para aplicar a metodologia Branch and Bound, devemos ter condições de calcular as condições de contorno de um exemplo de problema de otimização e meios de dividir a problema principal em sub-problemas.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 1 introduz a Tecnologia de Grupo no contexto do problema de otimização de um ambiente fabril frente à necessidade de modernidade e avanço tecnológico das empresas modernas. Considerando isto, são apresentados os objetivos gerais e específicos do presente trabalho, como a descrição sucinta da metodologia empregada para tal fim.

O Capítulo 2 apresentará um breve resumo sobre as características e benefícios da Tecnologia de Grupo no ambiente fabril, onde será feita uma rápida descrição dos principais sistemas produtivos.

O Capítulo 3 explora a característica do arranjo em grupo de ordenar peças e máquinas segundo a análise do fluxo de produção da empresa. Assim, modelos tradicionais de arranjo peça-máquina são apresentados.

O Capítulo 4 apresentará a metodologia adotada para formulação do problema, onde serão descritos os passos para construção do modelo Branch and Bound, onde as etapas necessárias para a construção da rede são descritas. É apresentado ainda um exemplo genérico a partir de um arranjo fabril baseado em uma indústria metal-mecânica.

O Capítulo 5 apresentará o software desenvolvido, ilustrando a interface com o usuário através dos dados de entrada e comandos de simulação para a formação de células.

O Capítulo 6 apresentará a análise de resultados para dois exemplos de arranjos fornecidos pela literatura, avaliando-se o presente algoritmo em relação a metodologias tradicionais de agrupamento de peças em famílias e máquinas em células. Os resultados serão expressos em termos de índices operacionais que representam a eficiência de produtividade de um layout fabril organizado em células.

O Capítulo 7 conclui o trabalho com algumas sugestões para trabalhos futuros e considerações finais.

2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS

Na mudança do século, F. W. Taylor já introduziu o uso mnemônico da classificação, que incorporou alguns conceitos que agora são conhecidos como Tecnologia de Grupo. No princípio dos anos 20, a Jones and Lamson Machine Company, empresa norte-americana do ramo metal-mecânico, construiu máquinas ferramenta empregando princípios de padronização de produtos, celularização da linha de produção, minimização de rotas e controle visual do trabalho. Através dos anos, estas e outras idéias foram refinadas e nomeadas de várias maneiras, mas a Tecnologia de Grupo não havia sido amplamente disseminada e reconhecida nas indústrias caracterizadas por produção de pequenos lotes (DeVries, 1976).

A Tecnologia de Grupo foi também empregada na Europa em uma variedade de formas por algum tempo. Os alemães registraram tê-la empregada durante a Segunda Grande Guerra em conjunto com a Suécia, prosseguindo com seu uso em pequena escala a partir de então. Os Russos evidenciaram muitos aspectos da filosofia através da publicação de um trabalho desenvolvido por S. P. Mitrofanov em 1959, intitulado *Scientific Principles of Group Technology*. Logo, países socialistas, tais como a Checoslováquia e Alemanha Oriental demonstraram grande interesse pelo assunto, bem como países altamente industrializados, como a Alemanha Ocidental, França, Itália, Holanda, Noruega, Suécia e o Reino Unido. Na Alemanha Ocidental, sob a direção de H. Opitz, o desenvolvimento da Tecnologia de Grupo foi conduzido na Universidade Técnica de Aachen. Desde os princípios da década de 60, a filosofia tem sido amplamente pesquisada e/ou aplicada no Reino Unido através de organizações governamentais, como o Centro de Tecnologia de Grupo, a Associação de Pesquisa de Engenharia de Produção (PERA) e por instituições educacionais, incluindo as Universidades de Aston, Birmingham e Manchester. Consultores privados tais como E.G. Brisch & Partners Ltd., W. J. Hancock & Co e organizações recentes têm contribuído significativamente para a adoção destes conceitos no Reino Unido e demais países com tecnologia de ponta. Desenvolvimentos paralelos ocorreram no Japão, onde as técnicas foram conduzidas em conjunto com o governo (Laboratório de Engenharia

Mecânica) e as indústrias (Sociedade Japonesa para a Promoção da Indústria Mecânica) (DeVries, 1976).

O escopo da TG é extenso. Desde os primeiros trabalhos esta característica têm sido consolidada na pesquisa de formação de famílias, e tem afetado todos os setores das empresas envolvidos no projeto de componentes, desenvolvimento de planos de processo, manufatura e montagem. Deve ser ressaltado que as técnicas são aplicadas à produção em massa, onde a abordagem de automação fixa (linhas transfer) é usada, e em fabricação de pequenos lotes de partes discretas. Em uma típica instalação fabril, os excessivos tempos de setup, causados pelo mix de produtos e pequenos tamanhos de lotes podem dominar os tempos totais de produção, ocasionados pelas extensas rotas percorridas pelos produtos necessárias às visitas aos postos de trabalho. A programação e o controle de produção torna-se complexo, inviabilizando a obtenção de informações on-line sobre tarefas particulares (Lorini, 1991).

O crescente interesse na Tecnologia de Grupo está relacionado com a popularidade da filosofia Just in Time (JIT) de gerenciamento da produção.

2.2 A DECISÃO DE IMPLEMENTAR TG PELAS INDÚSTRIAS

Uma das principais decisões que devem ser tomadas por uma empresa que decide adotar a TG é a escolha entre uma gradual ou uma imediata adoção da filosofia. O caminho gradual é o mais predominante devido ao menor grau de risco de quebras de produção envolvido. Este caminho, entretanto é o que exige maior tempo de implementação pelas gerências, onde problemas de relacionamentos interpessoais devem ser superados. Comunicar à todos os níveis hierárquicos da empresa o porquê e o que é a implementação da TG, é um passo essencial no sucesso da mudança (DeVries, 1976).

A figura 2.1 ilustra as funções operacionais e de staff que são afetadas pela introdução da TG. Aplicações bem sucedidas têm sido documentadas por empresas que implementaram times inter-disciplinares de TG consistindo de membros representando muitos departamentos envolvidos.

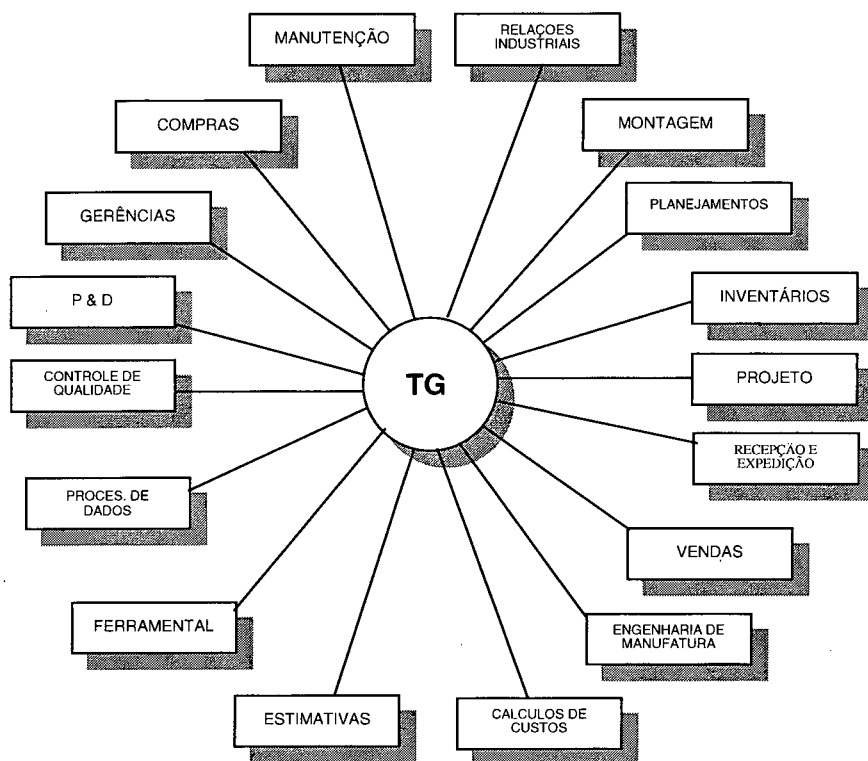


Figura 2.1: Funções operacionais e Staff afetadas pela Tecnologia de Grupo
(Fonte: DeVries, 1976)

É importante que estes times sejam compostos por indivíduos-chave na organização, que tenham condições de assumir responsabilidades importantes. O sucesso da implementação também exige uma seleção cuidadosa de operários para as primeiras células de manufatura, desde que suas operações sejam cuidadosamente estudadas por grupos de pesquisa.

Vários trabalhos ressaltaram a importância das características peculiares de cada indivíduo, considerando que tanto habilidades técnicas e comportamentais são fundamentais para o sucesso da aplicação da filosofia. Cabe apenas às gerências posicionar da melhor maneira possível o indivíduo de modo que o mesmo possa contribuir segundo seu estilo de trabalho, em equipe ou isolado, evitando-se preconceitos no processo de seleção.

A implementação da TG requer um compromisso principal por parte da gerência. É um passo que requer uma quantidade significativa de trabalhos preliminares como mostra a figura 2.2. Todas as operações da companhia devem ser cuidadosamente analisadas, onde vários pesquisadores têm sugerido um grande número de condições ótimas para a implementação da TG. Embora os benefícios são amplamente reconhecidos, é inevitável resistências à sua implantação em quase todas as instituições, tornando-a um problema universal. Deve-se considerar que celularizar integralmente uma fábrica é difícil, a menos que se faça uma revisão completa nos roteiros de produção, visando-se a adequação às condições de uma célula. Isto particularmente é mais acentuado em organizações conservadoras e que não acompanham as tendência de evolução nos processos produtivos e tecnológicos, gerando resistências às mudanças e adaptação de novas metodologias. O novo caráter multifuncional para os trabalhadores, exigindo maior especialização e dinamismo da nova mão-de-obra para o trabalho em células de manufatura, pode conflitar com os interesses da administração vigente das empresas.

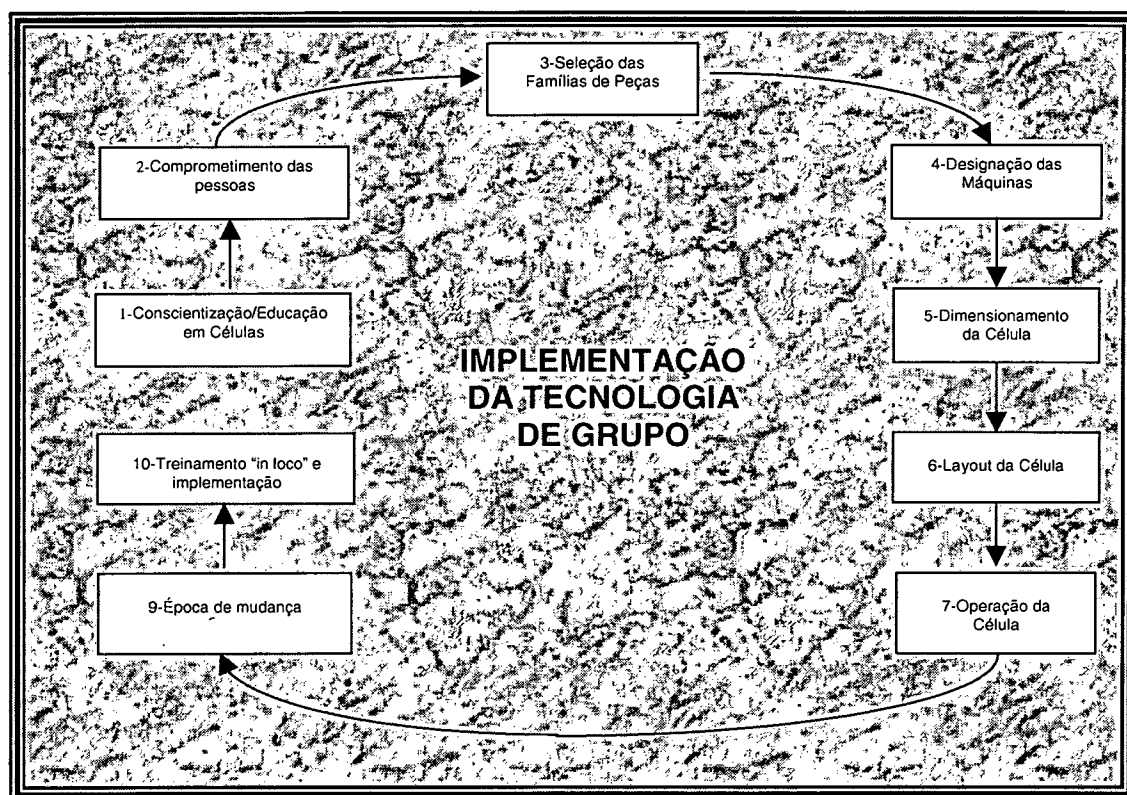


Figura 2.2: Etapas para a implementação da manufatura celular (Fonte: *Revista Controle de Qualidade*, 1993).

Em geral, alguns pré-requisitos são inerentes ao sucesso da aplicação (Wemmerlöv, 1984):

- um grande mix de produtos em pequenos lotes;
- precisão na obtenção de dados;
- controle de matérias-primas;
- a similaridade de produtos e processos;
- utilização balanceada de máquinas;
- um sistema apropriado de classificação e codificação; e,
- a necessidade de curtos prazos de entrega de materiais.

Um dos princípios que conduz à aplicação da TG, pressupõe a não utilização integral de todas as máquinas em um determinado arranjo fabril. Para quantificar isto, análises estatísticas têm sido feitas com os seguintes objetivos (Wemmerlöv, 1984):

- obter dados sobre o grau de utilização de características funcionais de máquinas;
- obter informações sobre distribuições estatísticas de tempos de execução de atividades nos postos de trabalho;
- fornecer dados sobre sistemas de planejamento de processo; e,
- determinar a frequência de ocorrência de determinados formatos similares de maneira que possam ser usados para desenvolver melhores sistemas de controle de produção para pequenos lotes.

Os diferentes caminhos para capitalizar as similaridades na TG são (Wemmerlöv, 1984):

- pela execução de atividades similares juntas, deste modo evitando tempos ociosos entre mudanças de atividades de processo;
- pela padronização de atividades, deste modo focalizando diferenças relevantes entre peças, e evitando esforços desnecessários; e,
- pela eficiente recuperação e armazenamento de informações relativas à problemas semelhantes, deste modo reduzindo tempos de pesquisa à informações repetidas e a necessidade de resolução de problemas repetidos.

Apesar de muitos trabalhos e pesquisas citarem os benefícios substanciais da Tecnologia de Grupo, sua implementação tem sido relativamente lenta no âmbito industrial. A principal razão é o alto custo de investimento com retorno à médio prazo, o que para empresas que já apresentam alta lucratividade representa uma barreira e risco.

2.3 ANÁLISE DOS PRINCIPAIS SISTEMAS PRODUTIVOS

Para se situar no contexto do problema, serão analisados quatro projetos de sistemas de manufatura que caracterizam o panorama atual das indústrias, com o objetivo de conduzir a um modelo que vise justificar o porquê de buscar uma nova situação para as indústrias que trabalham com lotes pequenos e médios de fabricação. Os sistemas identificados podem ser classificados em *layout* funcional (*job shop*), *layout* em linha (*flow shop*), *layout* de posição fixa (*project shop*), e o *layout* em grupo.

2.3.1 Layout em Linha

O princípio básico do “layout em linha” é a colocação das máquinas na seqüência em que serão usadas, visando a fabricação contínua das peças, onde caracteriza-se a produção em massa para grandes quantidades. O Layout em Linha é esquematizado na figura 2.3:

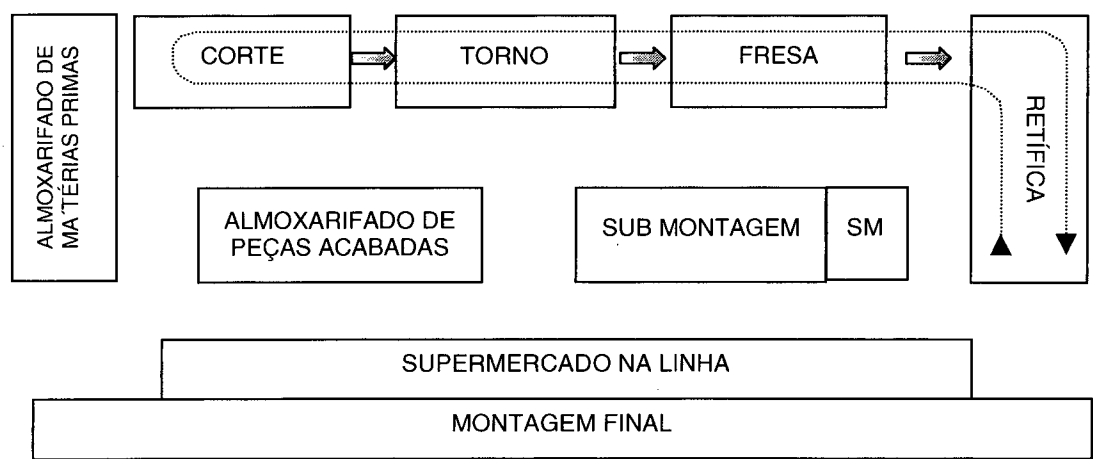


Figura 2.3: Representação do Layout em Linha (Fonte: Moura, 1989).

Dependendo da variação da demanda de produtos, pode ocorrer uma mudança de produção em lotes para grandes volumes fixos. O sistema de produção em linha evoluiu ao longo dos anos, onde a produtividade neste tipo de organização dependia em

grande parte da alta padronização dos produtos. Durante muitos anos, os grande períodos de ciclo de vida dos produtos permitiram que estas linhas pudesse ser altamente especializadas, viabilizando a produção de máquinas sofisticadas que utilizassem o mínimo de mão de obra. Um exemplo disso são as linhas *transfer* automatizadas para produção em grade escala de peças, como blocos para motor. Linhas *transfer* são exemplos de equipamentos complexos, caros e que exigem grande volume de produção para justificar os custos de aquisição e manutenção. Como mudanças de projeto no produto decorrentes de novas exigências no mercado normalmente não são prioridade nesta concepção, tais medidas devem ser ao máximo evitadas, daí a inflexibilidade do sistema (Black, 1998).

Segundo Black (1998), a maioria das fábricas são misturas de layout funcional e layout em linha. A demanda por produtos pode precipitar uma mudança de produção em lotes para grandes volumes e muita produção destas fabricas é consumida por aquela demanda fixa. Linhas de submontagens e linhas de montagens final são extensões adicionais do layout em linha.

Desde o nascimento da produção em massa, várias técnicas e métodos têm sido utilizados para desenvolver máquinas ferramenta que fossem altamente eficazes na produção em massa. Com as exigências do mercado, produtos fabricados necessitaram ir de encontro aos objetivos do mercado, os quais tiveram seus parâmetros de projeto constantemente atualizados de modo a atender às necessidades do cliente. Logo, sistemas automatizados tiveram que ser tão flexíveis quanto possível, mantendo a produção em massa. Daí justificou-se a criação do conceito de Sistemas Flexíveis de Manufatura. Um Sistema Flexível de Manufatura (figura 2.4/2.5) representa o mais alto grau de automação em uma linha de produção. É tipicamente definido como um conjunto de máquinas-ferramenta ligadas por um sistema computacional de movimentação de materiais, cujos componentes primários são máquinas-ferramenta de Controle Numérico, sistemas de movimentação de material, dispositivos de suporte (*pallets*) e redes de controle por computador

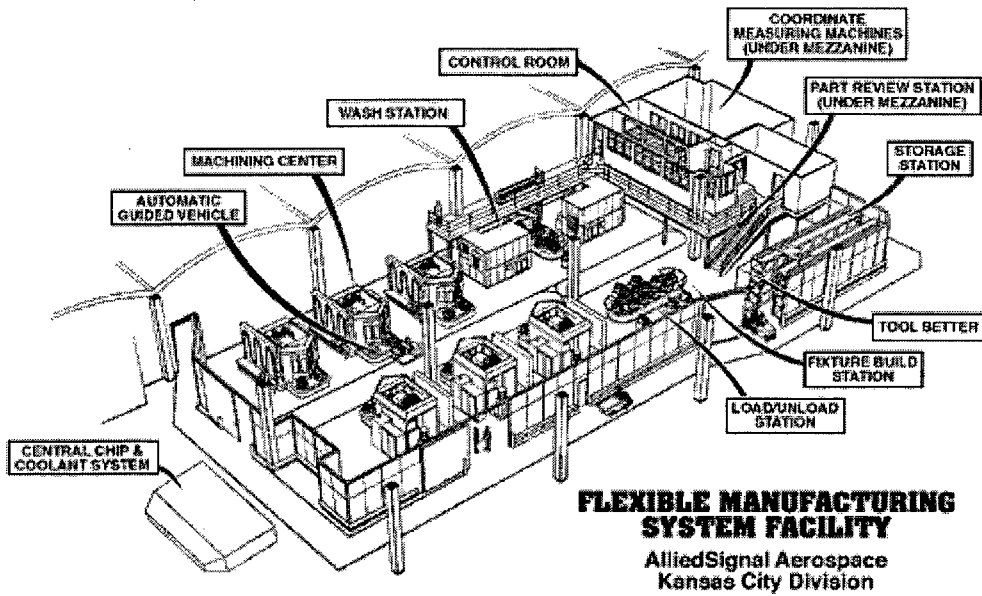


Figura 2.4: Sistema Flexível de Manufatura

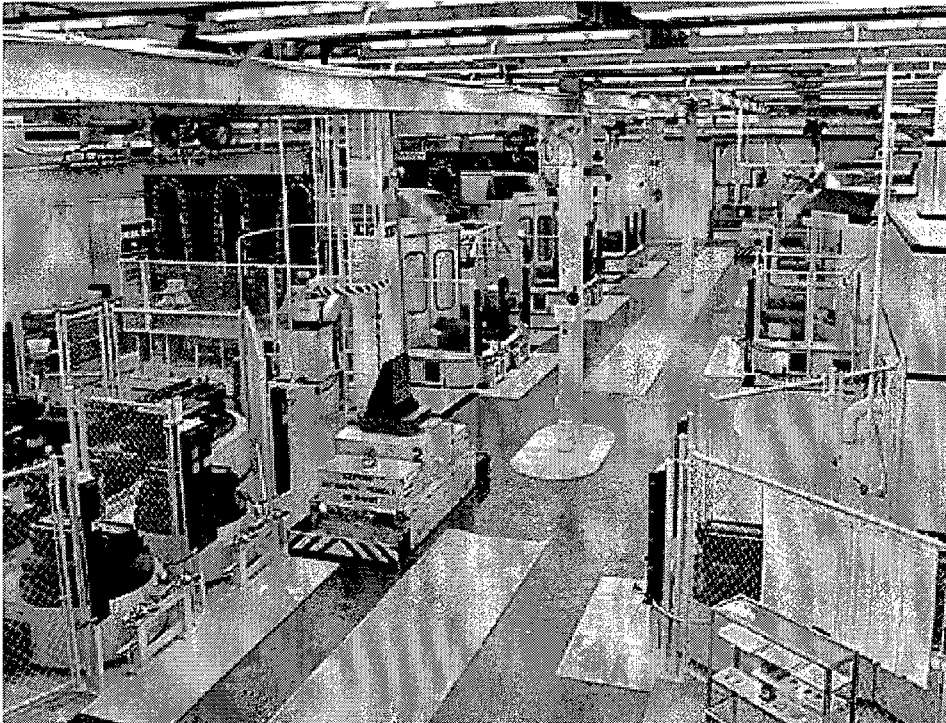


Figura 2.5: Sistema Flexível de Manufatura

Embora a idéia de um Sistema Flexível de Manufatura tem sido criada há quase vinte anos atrás, apenas há alguns anos despertou-se grande interesse no assunto,

que pode ser medido pelo número de livros editados, artigos, pesquisas e conferências realizadas. Resumidamente, o layout em linha apresenta as seguintes características (Montevechi, 1989):

- Utilização específica das máquinas;
- Grandes quantidades de peças semelhantes;
- Elevada produtividade;
- Controle de produção simplificado;
- Volume de produção dependente da linha;

Este tipo de “layout” traz algumas desvantagens, como:

- Baixa flexibilidade;
- Interrupções que causam grandes perdas;
- Elevado investimento inicial;
- Papel limitado do operário

2.3.2 Layout de Posição Fixa

Quando o produto a ser manufaturado apresenta dimensões que impossibilitam o seu deslocamento pelo layout fabril, os materiais, máquinas e pessoas são trazidos até o local onde a operação é levada em termo. Assim, isto caracteriza a produção de locomotivas, navios e aviões (figura 2.6), bem como nos trabalhos de construção de imóveis. Neste caso, quando a obra é terminada, todo o equipamento é retirado do local da construção.

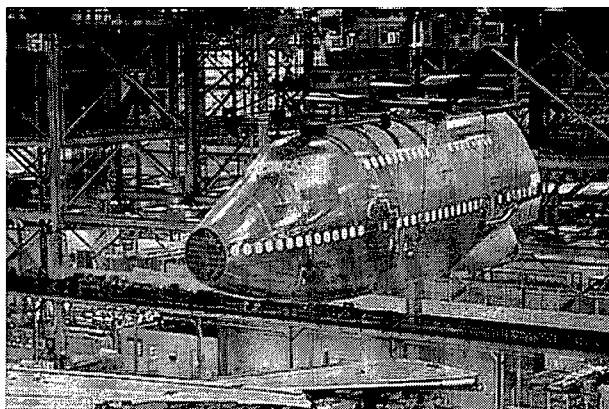


Figura 2.6: Linha de produção de aviões (Fonte: Boeing Co.)

2.3.3 Layout Funcional

Neste tipo de sistema de fabricação as máquinas são agrupadas funcionalmente de acordo com o tipo de processo, isto é, máquinas que desempenham as mesmas funções são posicionadas juntas, em determinados locais da fábrica. Por exemplo, em uma metalúrgica, tornos deverão se posicionar em um setor, furadeiras em outro, injetoras em outro bem como prensas deverão ocupar outro local. Nos Estados Unidos, é o sistema mais comum utilizado, em indústrias que usam uma grande variedade de equipamentos.

Neste tipo de sistema, a intenção é executar pedidos específicos para clientes, mas muitas vezes, devido às deficiências do sistema, ocorre apenas a produção de estoques fixos de produtos acabados. Cada peça diferente requer sua própria sequência de operações, podendo ser direcionada através dos setores na ordem apropriada.

Um exemplo do que ocorre em grandes empresas que utilizam o *layout* funcional é representado na figura 2.7 (Black, 1998). Como resultado, a administração da produção torna-se mais difícil, resultando em longos *lead times* e altos estoques intermediários em processo (*WIP*). Pode-se citar como vantagens deste arranjo (Montevechi, 1989):

- Flexibilidade de produção;
- Quebras de máquina não causam transtornos;
- Concentração de habilidades e ferramental.

Como desvantagens pode-se citar:

- Grandes lead-times;
- Controle de produção complexos;
- Alto custo de fabricação de cada peça;
- Baixos índices de utilização de cada máquina;
- Estoques intermediários;
- Excessivos tempos de movimentação.

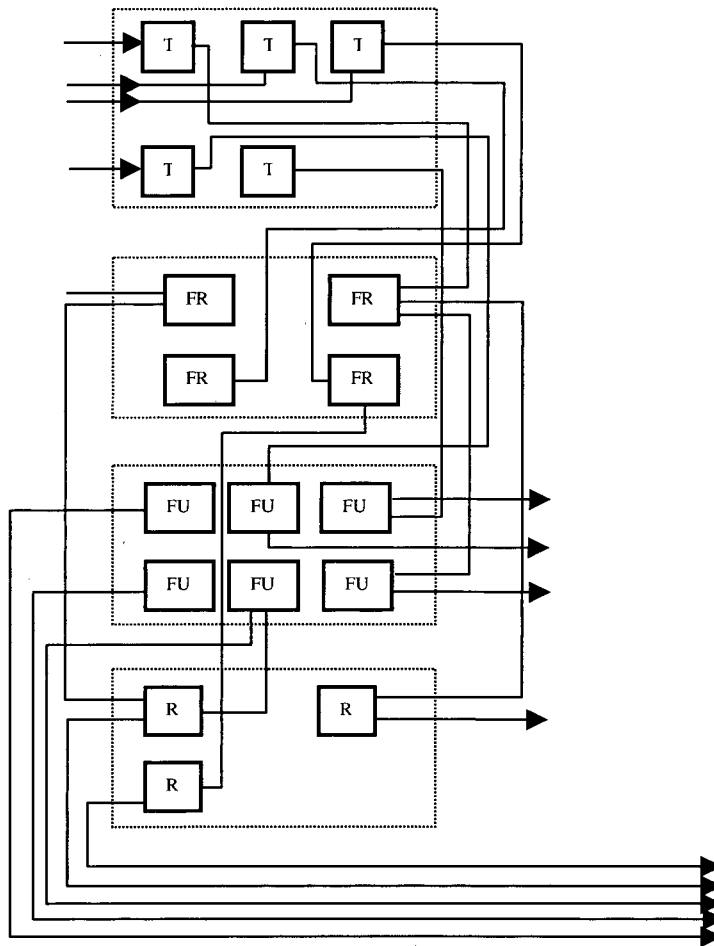


Figura 2.7: Layout Funcional (Fonte: Black, 1998)

A figura 2.8 ilustra como o *lead-time* de cada peça normalmente está dividido. Verifica-se assim que este tipo de *layout* causa uma porcentagem muito grande de tempos improdutivos.

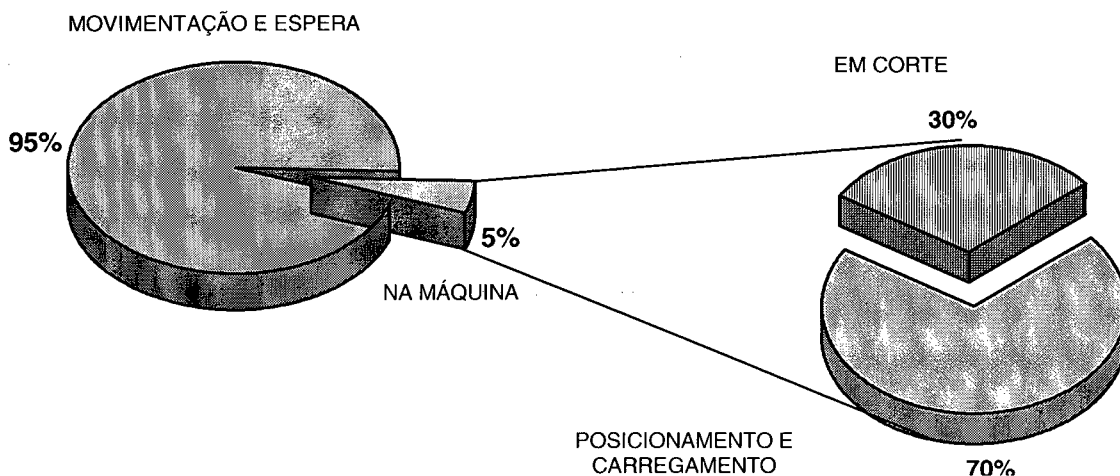


Figura 2.8: Tempos Totais de Produção (Fonte: Montevechi, 1989)

Segundo pesquisas, nos países industrializados a maior parte da produção é de pequenos e médios lotes. A tendência de demanda dos anos 80 e 90 difere de décadas anteriores, quando o ciclo de vida do produto era bem mais longo (Burbidge, 1981). E, no próximo século, as exigências serão ainda maiores, onde os administradores deverão estar atentos à adotar estratégias competitivas em cada estágio de vida do produto, face ao atendimento nas mudanças constantes nas necessidades dos consumidores e à concorrência, diversificação de modelos, características individualizadas de performance e lotes de produção cada vez menores. A figura 2.9 mostra a tendência de diversificação de produtos.

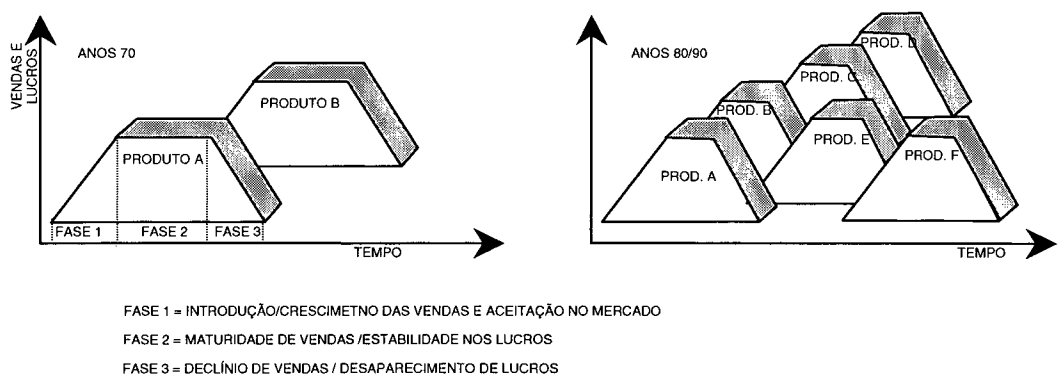


Figura 2.9: Diversificação de produtos exemplificado pelo ciclo de vida.
(Fonte: Burbidge, 1981)

Deve-se, então, visando o objetivo de simplificação, melhorar o sistema de “layout” funcional que se destina à produção destes lotes. A idéia é compatibilizar a produtividade dos sistemas tipo “layout” em linha com produção de pequenos e médios lotes. Para que isto ocorra, deverá ser feita uma avaliação dos objetivos de produção, e a revisão do fluxo industrial segundo as características de processamento de cada produto manufaturado. Isto resultará na divisão da fábrica em mini-fábricas, passíveis de um melhor gerenciamento e acompanhamento dos índices de produção.

Uma tentativa válida de se obter estes objetivos baseia-se na adoção do sistema tipo layout em grupo, explicado a seguir.

2.3.4 Layout em Grupo

Basicamente, o que se tenta obter com o layout em Grupo é dividir um sistema de manufatura em subsistemas, com o objetivo de maximizar a produção de uma grande variedade de produtos fabricados em pequenos lotes. A estrutura física do arranjo fabril visualizado na figura 2.10 caracteriza uma típica empresa que adota o sistema de produção por arranjo *funcional*, onde os departamentos são divididos de acordo com o tipo de processo executado em cada fase da elaboração dos produtos.

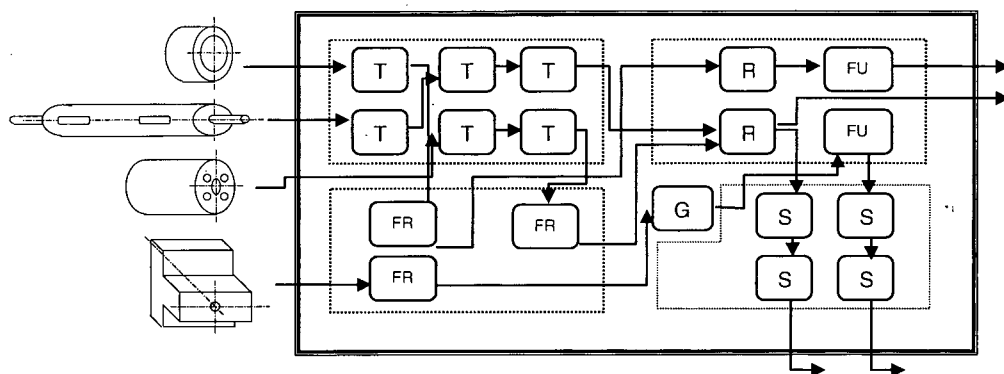


Figura 2.10: Layout organizado por processo (Fonte: Montevechi, 1989)

Agrupando-se peças similares em famílias é possível formar grupos de máquinas capazes de processá-las. Estes grupos de máquinas são denominados “células de produção”, as quais são indicadas na figura 2.11 pelas duas áreas isoladas. Nestas áreas, um determinado conjunto de máquinas é responsável pela execução dos peças indicadas logo acima. Este arranjo, chamado “layout em grupo”, visa melhorar a produtividade em indústrias de médios e pequenos lotes. Tenta-se assim, aliar a produtividade dos sistemas em linha com sistemas do tipo “layout funcional”. Evita-se o que ocorre tradicionalmente na fabricação à base de lotes, onde cada peça é tratada como se fosse única no projeto, no planejamento de processo e no controle de produção.

Definidos os fluxos de produção para os principais produtos para a empresa, pode-se elaborar o layout final para o setor produtivo. O projeto para adaptação da empresa à filosofia de Tecnologia de Grupo é elaborado tendo em vista sempre aspectos operacionais que possam ser postos em prática ao longo da implantação, como viabilidade de movimentação de máquinas, minimização de alterações na construção e mínimo investimento em recursos para adaptação.

Este tipo de sistema tem se tornado uma alternativa atrativa aos meios convencionais de produção devido principalmente à sua flexibilidade na adaptação às exigências do mercado, à qualidade dos bens produzidos e, naturalmente por ser economicamente atrativo devido à sua melhor produtividade em relação ao sistema com layout funcional .

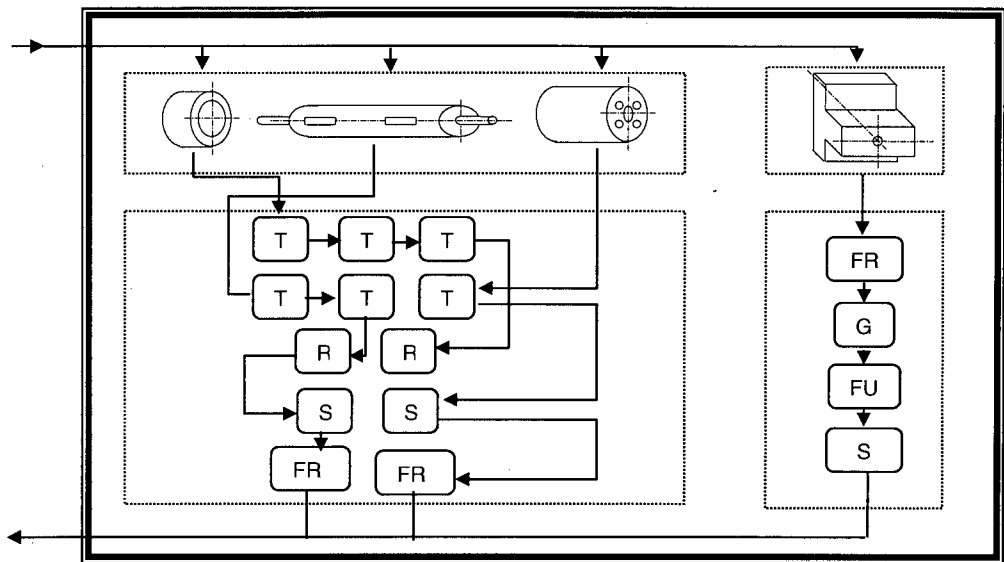


Figura 2.11: Conversão de um sistema tradicional *job-shop* em células de manufatura, utilizando o conceito da Tecnologia de Grupo (Fonte: Montevechi, 1989)

A flexibilidade aliada à produtividade conseguida com células de produção é mostrada esquematicamente na figura 2.12.(Montevechi, 1989):

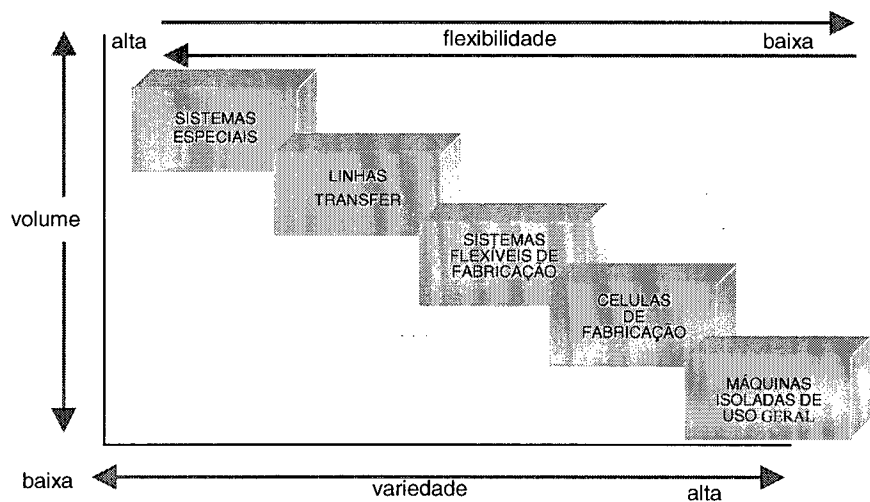


Figura 2.12: Sistemas de fabricação x volume e variedade de peças (Fonte: Montevechi, 1989)

De acordo com a figura 2.12, a adoção deste tipo de layout pode originar três tipos de células (Montevechi, 1989):

1. Máquinas isoladas;
2. Grupos de máquinas;
3. Grupos de máquinas obedecendo “Flow Shop”.

A célula de máquinas isoladas pode definir uma estação de trabalho onde determinada máquina ou operador executa uma atividade exclusiva para uma determinada peça, ou considerando ainda condições adversas que a impeçam de ser colocadas junto com outras máquinas em um arranjo fabril. Isto pode acontecer, por exemplo em estação de tratamento térmico de peças metálicas, onde as grandes dimensões dos equipamentos delimitam um espaço específico para os mesmos.

A célula tipo grupo de máquinas é aquela em que algumas máquinas são agrupadas para fabricação de famílias, mas não há previsão da sequência de movimentação das peças dentro da célula. Isto é, as peças podem não ter um fluxo direcionado no arranjo de máquinas que formam a célula. Podem ser processadas em uma máquina posterior e voltar para uma máquina anterior.

A célula de produção obedecendo à um “Flow Shop” é a reunião de um grupo de máquinas destinadas à fabricação de famílias, onde as peças passam pelas máquinas obedecendo uma sequência. Certamente algumas operações podem ser omitidas, mas o fluxo de trabalho precisa obedecer sempre a mesma direção.

A adoção do layout em grupo para atingir a produtividade em linhas de produção visa as seguintes vantagens (Montevechi, 1989):

- Redução dos custos de fabricação;
- Acompanhamento da produção;
- Redução dos tempos de preparação e fabricação;

- Menores estoques intermediários;
- Balanceamento da carga de trabalho entre os equipamentos

2.4 MÉTODOS DE FORMAÇÃO DE FAMÍLIAS

Segundo Lorini (1991), o termo família é usado para designar uma lista de peças agrupadas segundo suas características de similaridade (figura 2.13). Não existem regras rígidas ou gerais para determinar quais peças serão agrupadas em famílias, ficando a cargo de cada usuário determinar os critérios de agrupamento. Quando o interesse maior for o planejamento do processo, todas as peças agrupadas requisitarão semelhantes planos de processo, podendo então um processo padrão ser compartilhado por todos os componentes da família.

Encontrar famílias de peças é o primeiro passo para converter o sistema convencional em células, onde existem várias maneiras de se alcançar isto. Métodos de julgamento, usando o princípios de projetos axiomáticos são, naturalmente os mais fáceis e baratos, mas também são os menos compreensíveis. Técnicas de observação funcionam para estabelecimentos comerciais como lojas, bancos e restaurantes que apresentam simplicidade funcional, mas não em grandes layouts funcionais (*job shops*) onde o número de componentes pode atingir 10000 e o número de máquinas varia de 300 a 500.

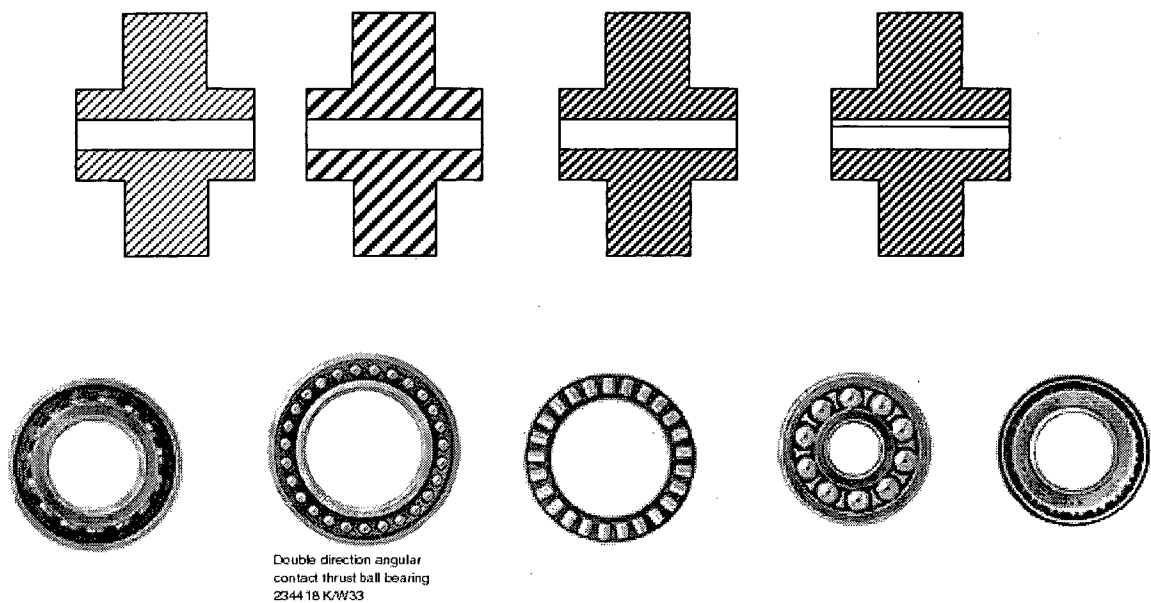


Figura 2.13: Similaridade nos processos de Fabricação

Existem três metodologias básicas para se resolver o problema, todos requerendo análise de dados por especialistas treinados, consumindo conseqüentemente tempos significativos. Os métodos considerados são os seguintes (Lorini, 1990):

- Inspeção visual;
- Classificação e Codificação
- Análise do Fluxo de Produção.

2.4.1 Inspeção Visual

Um dos mais simples métodos de agrupamento, o ocular ou manual, baseia-se na análise de dados, classificação e execução utilizando tão somente a experiência humana. Embora seja um dos métodos mais fáceis de se utilizar, seu sucesso depende grandemente da experiência humana, do conhecimento e de preferências. Devido a limitações naturais do ser humano, o número de componentes que podem ser manipulados é bastante limitado, impossibilitando o cálculo de grupos com mais de cem componentes. A inspeção visual vem tendo aplicação crescente nos últimos anos, mesmo associada a outras técnicas, principalmente em países de elevado avanço tecnológico e elevada industrialização, com grande redução nos tempos improdutivos e melhoria da qualidade.

2.4.2 Classificação e Codificação

Uma importante parte da Tecnologia de Grupo é o uso de sistemas de classificação e codificação adequada à indústrias que possuem grande mix de produção. Tal como um sistema de referência em uma biblioteca, serve como um índice de características na manufatura, na engenharia, em compras, no planejamento de recursos e vendas de maneira a aumentar a produtividade em cada uma destas áreas. As características de um sistema de codificação e classificação podem ser descritivas, funcionais, ou uma combinação de ambos, de acordo com a sua utilização. A figura 2.14 demonstra o que comumente se observa nos setores de projetos e Planejamento de Processos de uma indústria mecânica com fabricação à base de lotes. Apesar da criação permanente de novos desenhos de produtos, as características geométricas realmente

novas se reduzem à medida que a quantidade de desenhos liberados cresce. Já que, via de regra, à um novo projeto corresponde um novo planejamento de processo, (“Process Plan”), o mesmo se verifica na área de processos. O não aproveitamento do trabalho anterior resulta não apenas na duplicação improdutiva de trabalho, mas também na degradação da função do projetista, o qual precisa desprender boa parte de seu tempo no reprojeto de itens rotineiros.

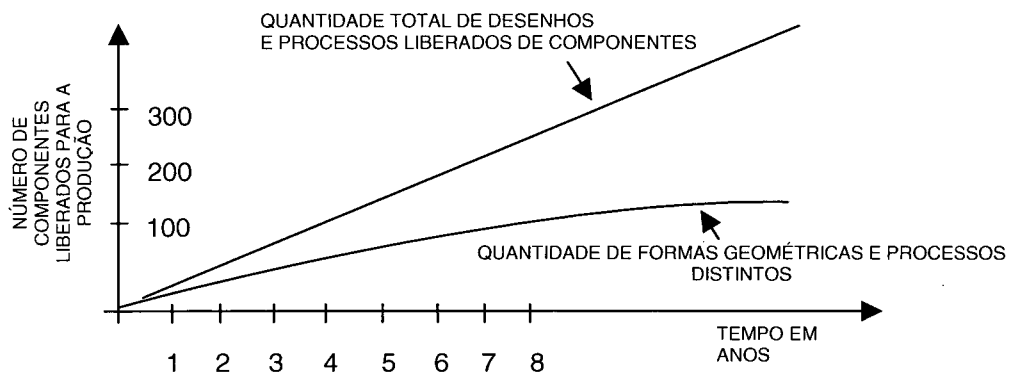


Figura 2.14: Proliferação de desenhos de componentes em contrapartida à novas formas distintas.

Tendo em vista o alto incômodo do ponto de vista operacional, gerando grande quantidade de elementos para manutenção de roteiros e desenhos, é imperativo um sistema de informações que acuse com rapidez as similaridades entre o novo projeto e aqueles existentes. Tal sistema traz como benefício imediato a redução no tempo de projeto, desenhos e planejamento de processos. A conseqüente padronização de projeto e processo introduz outros benefícios não quantificáveis de maior vulto econômico, como agilidade e velocidade na implementação de um determinado projeto. Entre outros benefícios de um sistema de classificação e codificação podem ser citados o estabelecimento de estatísticas sobre as peças, padronização do ferramental e processos, racionalização da programação e planejamento da produção, estimativas e contabilidade de custos mais apurados e estabelecimentos de uma base para manufatura.(Ham, 1982)

2.4.2.1 Tipos de estrutura de um código

Os códigos criados para a aplicação na Tecnologia de Grupo, identificando características de projeto ou de manufatura, podem ser estruturados sob três formas diferentes.

- Estrutura Hierárquica ou Monocódigo

É uma estrutura do tipo árvore onde cada dígito ou caracter amplia as informações do seu anterior, ou seja, o valor do dígito no código tem seu significado vinculado ao seu antecessor e não pode ser interpretado ou considerado isoladamente. Esta hierarquia proporciona uma análise muito mais ampla dos itens codificados, e torna a estrutura compacta, podendo assim, em um número relativamente pequeno de dígitos, representar grande quantidade de informações (Lorini, 1993). Um exemplo de uma estrutura monocódigo é apresentada na figura 2.15.

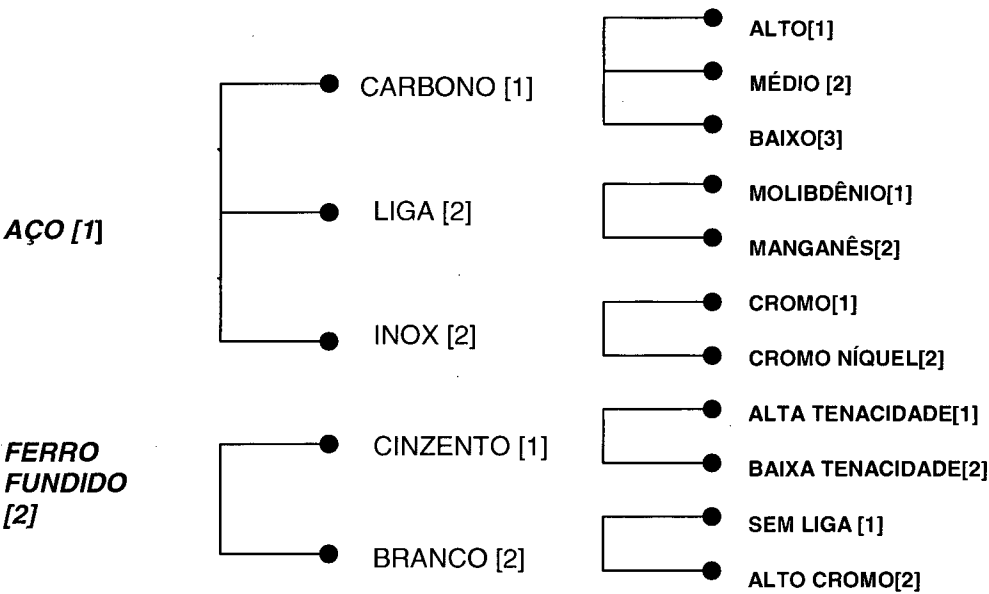


Figura 2.15: Uma estrutura monocódigo (Fonte: Lorini, 1993)

- Estrutura tipo cadeia ou policódigo

Neste tipo de código, cada símbolo é independente dos anteriores, isto é, cada símbolo identifica isoladamente um parâmetro. Não existe qualquer vinculação nas especificações que o traduzem, denotando um significado próprio. O código da estrutura em cadeia é também tratado na literatura como um policódigo, em virtude da independência dos símbolos transparecer como um encadeamento de códigos isoladamente significativos. Não existe qualquer hierarquia para a construção do código. Uma coluna sempre conterà a mesma informação naquela posição, independente do valor do código que a preceda. É um tipo de estrutura bastante adequada às aplicações voltadas à classificação de peças, máquinas e processos, embora requeira muitas vezes grande quantidade de símbolos. Lorini (1993) exemplificou o método através da consideração da matriz visualizada na figura 2.16, a qual define o fluxo de peças nas máquinas. A tabela da figura 2.17 mostra a especificação das máquinas na matriz com seus respectivos monocódigos, e a figura 2.18 mostra a especificação dos grupos de peças.

		peças																
		a	b	c	d	e	f	G	h	i	j	k	l	m	n	o		
máquinas	A-B								x	x		x		x	x			
	C								x	x	x	x						
	D		x		x			x										
	E-F			x		x				x	x							
	G	x					x						x					
	H-I	x	x	x	x	x	x						x	x	x	x		
	J-K	x	x	x	x	x	x						x	x	x	x		

Figura 2.16: Matriz com fluxo peça-máquina

MÁQUINA		CÓDIGO
A-B	-FURADEIRA	1
C	-TORNO	2
D	-PRENSA	3
E-F	-FRESADORA	4
G	-POLITRIZ	5
H-I	-RETÍFICA	6
J-K	-SERRA	7

Figura 2.17: Código para as máquinas (Fonte: Lorini, 1993)

PEÇAS	PROCESSO
a, f, l	567
c, e, o	467
b, d, g	367
m, n	167
h, k	12
j	24
i	124

Figura 2.18: Código para o processo (Fonte: Lorini, 1993)

- Estrutura combinada ou híbrida

A maioria das estruturas dos sistemas de códigos desenvolvidos é uma estrutura mista, isto é, constitui-se de uma associação de pequenos monocódigos interligados a policódigos. Dentre os sistemas mistos mais difundidos podem ser citados os códigos Opitz, o Code, o Miclass e o Tecla (Lorini, 1993).

Considerando as ilustrações dos exemplos anteriores, para um policódigo da figura 2.18 e um esquema da figura 2.15, que indica a formação de monocódigo para o material, pode-se combinar este com o código que define o respectivo processo, resultando em um tipo de código híbrido, como é exemplificado abaixo:

-peça “a”: código combinado 132 567, onde 132 representa o código do material (monocódigo) e 567 representa o código do processo (policódigo).

2.4.2.2 Alguns sistemas de classificação e codificação

Muitos sistemas de classificação e codificação foram propostos por pesquisadores isolados e organizações de pesquisa aplicada, em países pioneiros no desenvolvimento de sistemas utilizando a Tecnologia de Grupo, tais como a Alemanha, Japão e Holanda. Dentre os principais sistemas propostos destaca-se o Opitz, desenvolvido na Universidade de Aachen, Alemanha, o sistema MICLASS (Metal Institute Classification System), desenvolvido na Holanda, e o sistema KK-3, muito

difundido para processos de corte e retifica, desenvolvido no Japão, o qual o demonstraremos através de um exemplo a seguir. A literatura indicada fornece maiores detalhes sobre os demais métodos (Lorini, 1993).

O sistema KK-3, em sua primeira versão, em 1970, foi apresentado como KK-1, baseando-se num código de dez dígitos, mesmo tamanho mantido na segunda versão em 1973, como KK-2. Na versão atual, apresentada em 1976 como KK-3, o código passa a ter um tamanho de 21 dígitos decimais, um código bem mais completo que mantém compatibilidade com as antigas versões apenas nos oito primeiros dígitos.

O primeiro dígito faz uma distinção geral relativa à função principal das peças, como eixos, engrenagens, etc. No segundo dígito, são descritos maiores detalhes funcionais, como o tipo de engrenagem e do eixo. Com apenas dois dígitos, o sistema possibilita a classificação de mais de cem especificações funcionais para as peças rotacionais e não rotacionais. Nos demais dígitos, obtém-se uma completa descrição das peças. Por exemplo, a peça ilustrada na figura 2.20b pode ser codificada segundo suas características de geometria, materiais, dimensões e elementos secundários. Tais características então são expressas dentro de um código numérico, tal como é ilustrado na figura 2.19

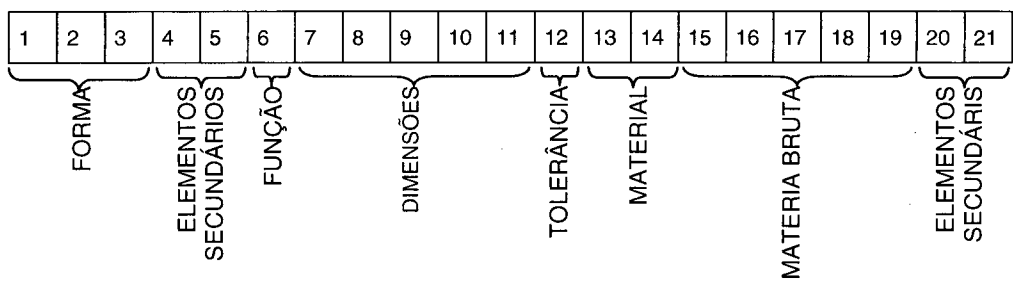


Figura 2.19: Exemplo de sistema de codificação de uma família de peças

A figura 2.20a representa um exemplo do código da peça representada na figura 2.20b. Montado em uma matriz com o código de todas as peças (figura 2.21) pode-se pesquisar por aquelas peças que se enquadram dentro de uma faixa de valores admitidos como limitantes da similaridade desejada. Assim torna-se fácil identificar peças similares ao projeto em questão, através de códigos similares ou códigos exatamente iguais. Primeiramente, identifica-se quais as peças que possuem exatamente o mesmo

componentes que requerem máquinas e ferramental similares podem ser processadas em sequência, de tal maneira a maximizar a quantidade por setup e, consequentemente reduzindo tempos e custos de setup. As máquinas utilizadas na produção de componentes similares são agrupadas de modo a formar um grupo ou célula (daí o nome *células de manufatura*). A simplificação de material escoando em uma célula é mostrado na figura 2.24. O layout resultante apresenta características de tal maneira a haver redução dos problemas de programação da produção, controle de produção, manuseamento de material, ao mesmo tempo incrementando a interação entre o trabalho dos operadores.

Figura 2.24: Ilustração de um Layout baseado em células de manufatura, no qual o escoamento de material é eficientemente simplificado (Fonte: DeVries, 1976).

O método da Análise do Fluxo de Produção é simples, rápido e barato, mas com julgamento mais analítico do que tácito. É uma ferramenta poderosa no problema de reorganização de sistemas, reduzindo em muito a incerteza na tomada de decisão de reorganização. Como parte desta técnica, é feita uma análise do fluxo de material na fábrica inteira, colocando a base para o novo layout de células interligadas na fábrica inteira, como mostra a Figura 2.25. De acordo com a Figura 2.25a, a representação de um roteiro de produção é idealizada através de uma matriz peça-máquina, onde cada correspondência de processamento entre peça e máquina é identificada na correspondente interseção linha coluna. Após a análise e reagrupamento de peças e máquinas, o objetivo final é representado na Figura 2.21b.

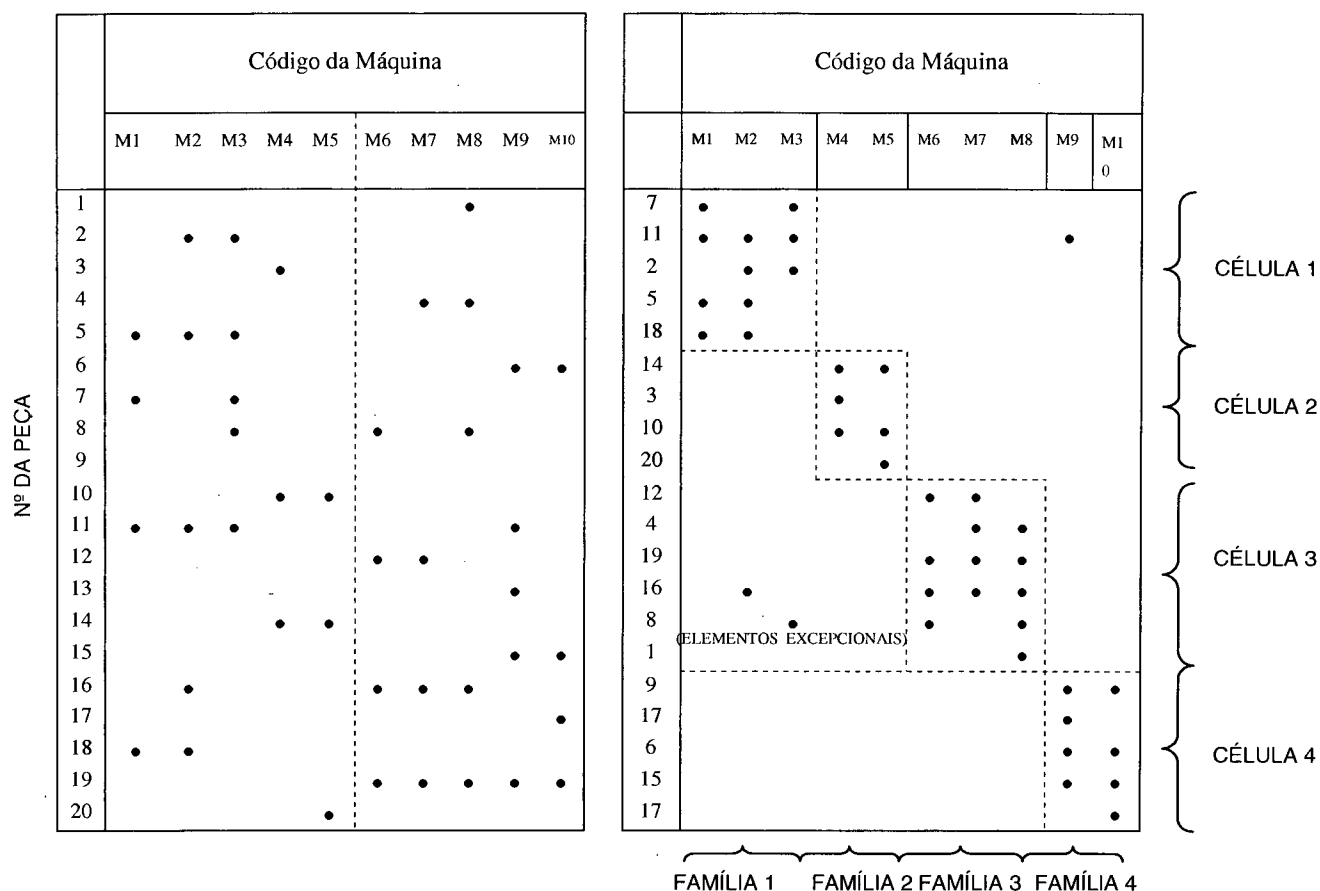


Fig. 2.25a (antes)

Fig. 2.25b (depois)

Figura 2.25: Representação matricial de células (à direita) formadas após AFP (Fonte: Black, 1998)

2.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi realizada uma apresentação dos principais sistemas produtivos. Quatro sistemas de manufatura puderam ser identificados: layout em linha (*flow shop*), layout de posição fixa, layout funcional (*job shop*), e layout em grupo. Cada sistema apresenta características que se adaptam a setores distintos na indústria, seja para produzir grande variedade de produtos em pequenos lotes, para produzir em grandes quantidades de um único produto, ou para a produção de itens de grande dimensão. No próximo capítulo, a sistema de layout em grupo será explorado tendo em vista sua característica de formar células de manufatura, a partir da ordenação de peças e máquinas segundo análise do fluxo de produção.

CAPÍTULO 3– MÉTODOS DE FORMAÇÃO DE CÉLULAS SEGUNDO A ANÁLISE DO FLUXO DE PRODUÇÃO

As metodologias tradicionais de redução de movimentos intercelulares têm sido amplamente pesquisadas, incluindo numerosos algoritmos de agrupamento celular. A Tabela 3.1 sumariza alguns algoritmos encontrados na literatura .

Tabela 3.1: Principais métodos encontrados na literatura

Método	Critério	Referências
(1)Ordenação Vetorial		
(a) Rank Order Clustering	Valor Binário	King(1980)
(b) Direct Clustering Analysis	-	Chan e Milner(1982) e Wemmerlov(1984)
(c) Bond Energy Analysis	Energia de Ligação	Gongaware e Han (1981), McCormick (1972)
(2) Agrupamento Hierárquico		
(a) Single Linkage	Coeficiente de Similaridade	Carrie(1973), McAuley (1972), Mosier (1989)
(b)Average Linkage	Coeficiente de Similaridade	Tarsuslugil e Bloor(1979)
(C)Complete Linkage	Coeficiente de Similaridade	Mosier (1989), Tarsuslugil e Bloor (1979)
(d)Centroid	Coeficiente de Similaridade	Mosier (1989), Tarsuslugil e Bloor (1979)
(e)Median	Coeficiente de Similaridade	Tarsuslugil e Bloor(1979)
(3) Técnicas Heurísticas		
(a)FACT *	-	Kamal (1996)
(b)Multi Objective *		Su (1998)
(b)Tree Search *	-	Cheng (1996)
(c)Branch and Bound *	-	Al-Qattan (1990)

Fonte: Chu, 1990 (* metodologias implantadas após a publicação do artigo)

As características dos principais métodos de formação de famílias são apresentadas a seguir.

3.1 AGRUPAMENTOS BASEADOS NA ORDENAÇÃO VETORIAL

Considera-se como agrupamentos baseados em ordenação vetorial todos aqueles procedimentos onde se busca a formação de famílias através do rearranjo de linhas e colunas na Matriz de Incidência. A finalidade é visualizar todas as peças que requerem as mesmas rotas de processo. Muitos trabalhos têm proposto procedimentos para a avaliação dos métodos de agrupamento celular baseadas no arranjo vetorial, levantando questões como: Que tipo de medidas podem ser usadas para comparação?; Quais as melhores técnicas? e; Quais as técnicas que melhor gerenciam elementos excepcionais. Os métodos mais conhecidos são o Rank Order Clustering (ROC), Direct Clustering Analysis (DCA), e Bond Energy Analysis (BEA).

3.1.1 Rank Order Clustering (ROC)

O método Rank Order Clustering (ROC) é um processo de agrupamento através do rearranjo de linhas e colunas de uma matriz formada por valores binários proposta por King em 1980 e posteriormente aperfeiçoado por King e Narkornchai. Embora o algoritmo seja fácil de aplicar, possui muitas desvantagens. Primeiro, a qualidade dos resultados depende muito da posição inicial da matriz de incidência. Segundo, os valores binários (de potência 2) usados para o rearranjo de linhas e colunas restringem o tamanho do problema, para grandes matrizes. O algoritmo para o método ROC é mostrado na figura 3.1.

Para melhor ilustrar a metodologia, considere a matriz da figura 3.2, extraída de Lorini (1993). O arranjo matricial da figura 3.2 representa em que máquinas ou postos de trabalhos, as peças são processadas em um determinado arranjo fabril. Como se pode observar na matriz, também denominada Matriz de Incidência, cada linha representa uma determinada máquina e, cada coluna, representa uma peça dentro do conjunto total de peças disponíveis no processo. A matriz é binária, indicando que se uma determinada peça é processada por uma máquina, o valor ocorrente na interseção da coluna/linha correspondente é "1". Caso contrário, se a determinada peça não é processada pela máquina, o valor correspondente torna-se zero.

Para a ordenação das linhas, primeiramente estabelece-se o respectivo valor para cada linha e sua posição correspondente à uma ordem de grandeza decrescente dos valores. Assim, tomando-se como exemplo a matriz apresentada na figura 3.3 de Lorini (1990), na linha 1 o valor da palavra binária (001010) seria o decimal 10, cujo resultado final será a soma das potências 2^1 e 2^3 , como mostra a equação (3.1):

$$(0 \times 2^5) + (0 \times 2^4) + (1 \times 2^3) + (0 \times 2^2) + (1 \times 2^1) + (0 \times 2^0) = 10 \quad (3.1)$$

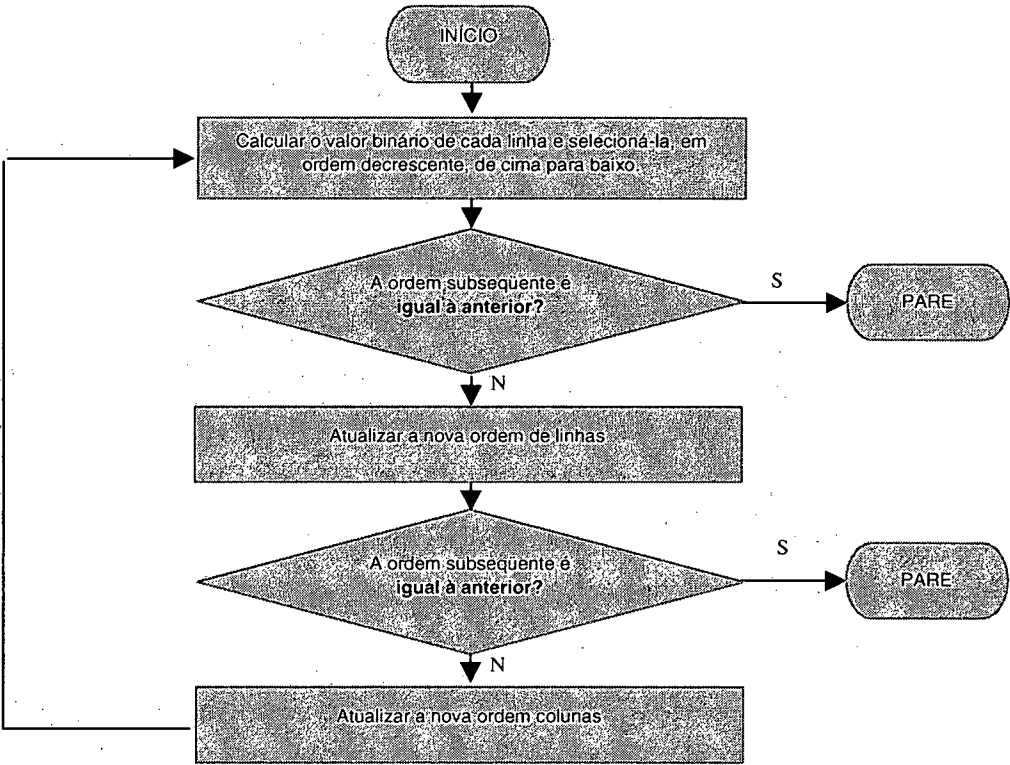


Figura 3.1: Fluxograma para o método Rank Order Clustering - R.O.C.
(Fonte: Chu, 1990)

De forma análoga para as demais linhas, os resultados das potências são visualizadas na coluna “Valor”, e suas respectivas posições no ranking são visualizadas na coluna “Ordem”.

		Peças						Valor	Ordem
		P1	P2	P3	P4	P5	P6		
Máquina.	M1	$\begin{pmatrix} & & 1 & & 1 & \\ & 1 & 1 & & & \\ 1 & & & 1 & & \\ & 1 & 1 & & & \\ 1 & & & 1 & & 1 \end{pmatrix}$						10	5 ^a
	M2							24	4 ^a
	M3							36	2 ^a
	M4							24	3 ^a
	M5							37	1 ^a
Pesos		2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰	SOMA	

Figura 3.2: Matriz com ponderação nas linhas

Para a ordenação das colunas, da mesma forma estabelece-se o respectivo valor para cada coluna e sua posição correspondente à uma ordem de grandeza decrescente dos valores. Assim, tomando-se a coluna 1 (figura 3.3), o valor da palavra binária (000011) seria o decimal 03, cujo resultado final será a soma das potências 2⁰ e 2¹.

		Peças						Pesos	
		P1	P2	P3	P4	P5	P6		
Máquina.	M1	$\begin{pmatrix} & & 1 & & 1 & \\ & 1 & 1 & & & \\ & 1 & 1 & & & \\ 1 & & & 1 & & \\ 1 & & & 1 & & 1 \end{pmatrix}$						2 ⁴	
	M2							2 ³	
	M4							2 ²	
	M3							2 ¹	
	M5							2 ⁰	
Valor		3	12	28	3	16	1	SOMA	
Ordem		4 ^a	3 ^a	1 ^a	5 ^a	2 ^a	6 ^a		

Figura 3.3: Matriz com ponderação nas colunas

Alterando-se a posição das linhas e colunas para a ordem decrescente, e repetindo-se o processo, se necessário, até que todas as linhas e colunas estejam ordenadas, resulta uma matriz classificada, ou seja, com uma definição de agrupamentos conforme mostra a figura 3.4.

Máquina.	Peças						VALOR	ORDEM
	P3	P5	P2	P1	P4	P6		
M1	1	1					10	1 ^a
M2	1		1				24	2 ^a
M4	1		1				24	3 ^a
M3				1	1		36	4 ^a
M5				1	1	1	37	5 ^a
<u>VALOR</u>		28	16	12	3	3	1	
<u>ORDEM</u>		1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	

Figura 3.4: Matriz com linhas e colunas ordenadas

Outras propriedades do método revelam que dados importantes no projeto de um sistema celular são desconsiderados, como volumes de produção, seqüência das operações e tempos de processamento. A presença de máquinas-gargalo também prejudica a diagonalização da matriz resultante, o que normalmente pode ocorrer em um ambiente fabril.

3.1.2 Direct Clustering Analysis (DCA)

O processo Direct Clustering Analysis - DCA, pesquisado por Chan e Milner (1973), posiciona as linhas da matriz de incidência com o maior número de células positivas no alto, e as colunas com o maior número de células positivas mais à esquerda. Após muitas iterações, todas as células positivas serão agrupadas em células. Muitos autores têm criticado o método devido à deficiência de formação de células em algumas matrizes de entrada. A algoritmo para o método DCA é mostrado na figura 3.5.

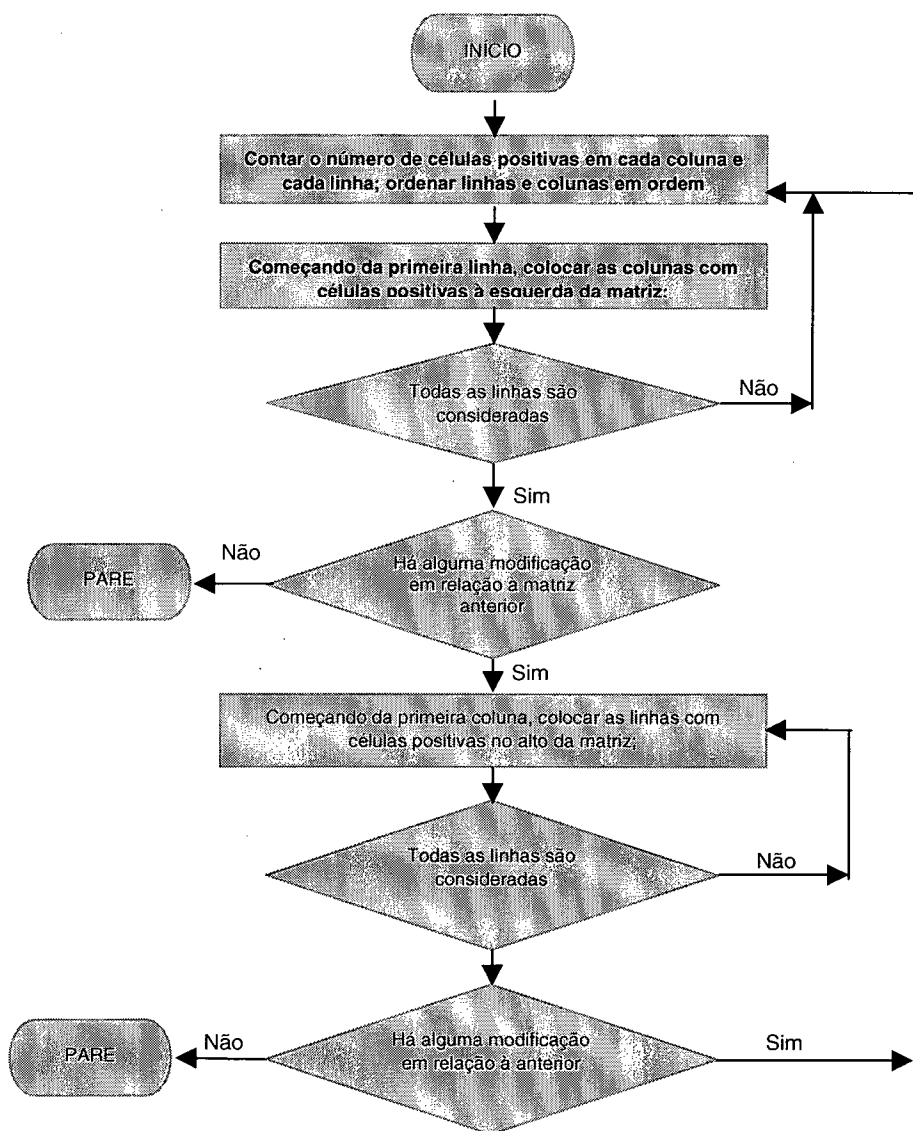


Figura 3.5: Fluxograma para o método Direct Clustering Analysis - DCA
(Fonte: Chu, 1990)

Para exemplificar o método, utilizar-se-á como referência a matriz de incidência da figura 3.2. Observa-se que o critério utilizado deverá ser simplesmente a ordenação do somatório de células positivas nas linhas e colunas. Na figura 3.6a, o somatório de células positivas para cada linha é indicada na coluna “ Σ Linhas” e o somatório de células positivas para cada coluna é indicada na linha “ Σ Colunas”. Como linhas ou colunas poderão apresentar o mesmo número de células positivas, o método possibilita muitas soluções alternativas. Uma delas é mostrada na figura 3.6b.

		Peças						Σ LINHAS
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	
Máquina.	M1			1		1		2
	M2		1	1				2
	M3	1			1			2
	M4		1	1				2
	M5	1			1		1	3
Σ COLUNAS		2	2	3	2	1	1	

Fig. 3.6a

							Σ LINHAS
	P3	P2	P4	P1	P6	P5	
M5			1	1	1		3
M3			1	1			2
M1	1					1	2
M4	1	1					2
M2	1	1					2
Σ COLUNAS	3	2	2	2	1	1	

Fig. 3.6b

Figura 3.6: Ordenação de linha e colunas através do método Direct Clustering Analysis; ponderação de linhas colunas (Fig. 3.6a) e ordenação (Fig. 3.6b)

O método DCA apresenta a vantagem em relação ao ROC de exigir menor capacidade computacional para a ordenação de grandes matrizes, uma vez que são considerados apenas o somatório de células positivas em linhas e colunas.

3.1.3 Bond Energy Analysis (BEA)

O propósito do método Bond Energy Analysis (BEA) desenvolvido por McCormick (1972) é identificar e mostrar agrupamentos naturais de elementos de maior afinidade. Uma medida de efetividade (**ME**) é usada pelo algoritmo, definida de tal maneira que um arranjo que possua alta densidade de elementos possui maior **ME** que um mesmo arranjo na qual a disposição dos elementos esteja mais dispersa. A definição da **ME** para um arranjo leva em conta o vínculo que existe entre cada elemento e os seus vizinhos, na corrente disposição. A avaliação de **ME**, para uma dada matriz de incidência $A(M,N)$ é dada pela equação (3.2):

$$ME(A) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=M} \sum_{j=1}^{j=N} a_{ij} [a_{i,j+1} + a_{i,j-1} + a_{i+1,j} + a_{i-1,j}] \quad (3.2)$$

onde

M - número total de máquinas;

N – número total de peças;

$a_{i,j} = 1$, se a máquina j processa a peça i

$a_{i,j} = 0$, caso contrário

$1 \leq j \leq M$

$1 \leq i \leq N$

A **ME** definida têm muitas vantagens teóricas e computacionais (McCormick, 1972), tais como:

- Aplicação à vetores de qualquer tamanho e formato. O único requisito é que os elementos não sejam negativos;
- Desde que as ligações verticais (horizontais) não sejam afetadas pela troca de colunas (linhas), o **ME** decompõe-se em duas partes: uma que corresponde à soma das ligações verticais, e outra à soma das ligações horizontais. Consequentemente, a otimização do **ME** pode ser alcançada em exatos dois passos, um encontrando a permutação ótima de colunas, e outra, encontrando-se a permutação ótima de linhas; e,
- Desde que a contribuição à **ME** de qualquer coluna (linha) é somente afetada pelas duas colunas (linhas) adjacentes, a otimização da **ME** conduz à eficientes procedimentos de retorno marginal ou seqüenciamento.

O método BEA pode ser aplicado à qualquer matriz de incidência onde a rápida decomposição, segundo interação de variáveis é desejada. As variáveis de entrada podem ser listadas em qualquer ordem, e os dados numéricos não precisam ser necessariamente muito precisos, sendo que os procedimentos não perdem quaisquer informações. A figura 3.7 ilustra o fluxograma para o método BEA.

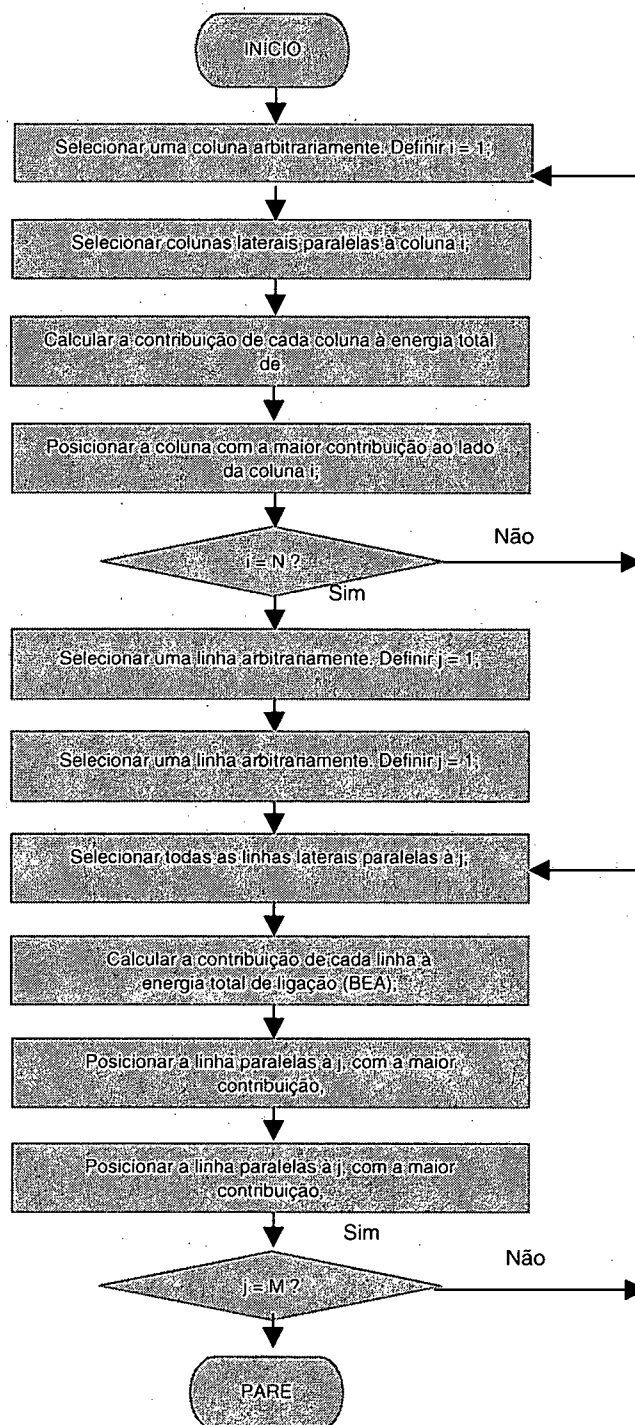


Figura 3.7: Fluxograma para o método Bond Energy Analysis - BEA
(Fonte: Chu, 1990)

Segundo Lorini (1990), este método pode ser aplicado para qualquer tipo de arranjo, desde que os elementos não sejam negativos. Como mostra a figura 3.8, a ME pode ser representa pela número de vínculos entre dois elementos adjacentes.

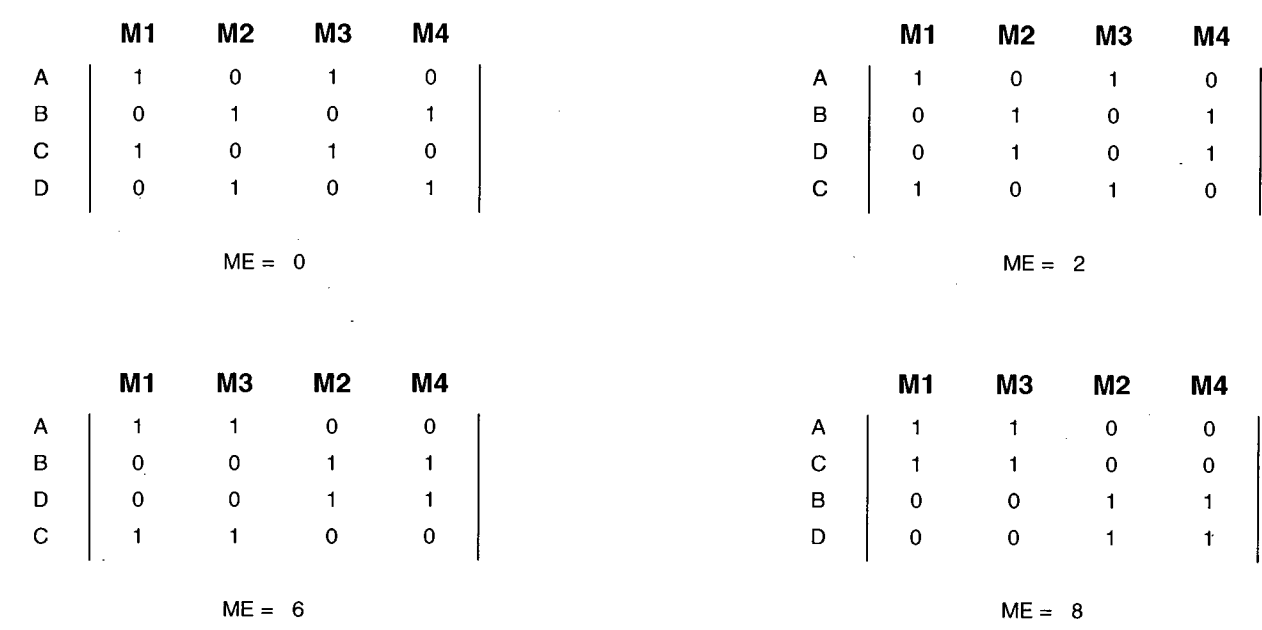


Figura 3.8: Valores de efetividade ME

3.2 MÉTODOS BASEADOS EM AGRUPAMENTOS HIERÁRQUICOS

As metodologias que consistem na similaridade e dissimilaridade entre máquinas em relação à sua utilização nas peças a serem processadas são conhecidas como agrupamentos hierárquicos. Métodos empregando o coeficiente de similaridade incorporam um conjunto de algoritmos de agrupamento desenvolvidos no campo da taxonomia numérica, e tem sido aplicados para a formação de células de manufatura. Nesta metodologia, uma medida de similaridade entre objetos (coeficiente de similaridade) é definida e usada para agrupá-los em agrupamentos. Em uma célula de máquinas, o coeficiente de similaridade entre duas máquinas é definida como o número de peças visitando ambas as máquinas dividido pelo número de peças visitando uma das duas máquinas. A definição é baseada no Coeficiente de Similaridade de Jaccad e pode ser matematicamente expressa pela equação 3.3 (Seifodinni, 1990).

$$S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N X_{ijk}}{\sum_{k=1}^N Y_{ijk}} \quad (3.3)$$

onde:

S_{ij} = coeficiente de similaridade entre as máquinas i e j ;

N = número de peças;

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{se a peça } k \text{ visita ambas as máquina } i \text{ e } j; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$Y_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{se a peça } k \text{ visita uma das máquina } i \text{ e } j; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Dentre os métodos mais difundidos estão o Single Linkage Clustering e o Average Linkage Clustering.

3.2.1 Single Linkage Cluster (SLINK)

O método Single Linkage Clustering (SLINK), desenvolvido por Sneath (Sokal e Sneath 1968) foi aplicado ao problema de Análise de Fluxo em um layout fabril por McAuley (1972). O método envolve um processo hierárquico de agrupamento de máquinas de acordo com seus coeficientes de similaridade. O coeficiente de similaridade genérico, como apresentado na equação 3.3 pode ser redefinido simplifcadamente através dos seguintes parâmetros :

$N(a)$ = número de peças que requerem ambas as máquinas "j" e "k";

$N(b)$ = número de peças que não requer nenhuma das duas máquinas

$N(x)$ = número de peças que requerem apenas a máquina "j";

$N(y)$ = número de peças que requerem apenas a máquina "k";

U = número de peças que requerem apenas uma das máquinas, podendo ser expresso por:

$$U = N(x) + N(y) \tag{3.4}$$

S (j,k) = Coeficiente de Similaridade entre as duas máquinas "j" e "k", podendo ser expresso como:

$$S (j, k) = \frac{N(a)}{N(a) + U} \tag{3.5}$$

Considere o exemplo ilustrativo, para a seguinte matriz de rotas peça-máquina (figura 3.9), e o cálculo de seus coeficientes de similaridade de similaridade, conforme tabela 3.2.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
M1	1	1				1	1	1		
M2			1	1	1				1	1
M3			1	1	1					1
M4			1	1		1			1	
M5	1	1					1	1		

Figura 3.9: Matriz peça-máquina

Tabela 3.2: Índices e coeficientes de similaridade

	N(a)	N(b)	N(x)	N(y)	S(x,y)
S(M ₁ ,M ₂)	0	0	5	5	0
S(M ₁ ,M ₃)	0	1	5	4	0
S(M ₁ ,M ₄)	1	2	4	3	0,12
S(M ₁ ,M ₅)	4	5	1	0	0,8
S(M ₂ ,M ₃)	4	5	1	0	0,8
S(M ₂ ,M ₄)	3	4	2	1	0,5
S(M ₂ ,M ₅)	0	1	5	4	0
S(M ₃ ,M ₄)	2	4	2	2	0,33
S(M ₃ ,M ₅)	0	2	4	4	0
S(M ₄ ,M ₅)	0	2	4	4	0

De posse dos coeficientes de similaridade, é possível construir uma matriz de coeficientes de similaridade, tal como é mostrado na figura 3.9.

	1	2	3	4	5
1		0	0	0,12	0,8
2			0,8	0,5	0
3				0,33	0
4					0
5					

Figura 3.10: Matriz de coeficientes de similaridade correspondente à matriz da fig. 3.9.

O procedimento seguinte é construir um diagrama chamado dendograma, o qual é mostrado na figura 3.11. Ao lado esquerdo do dendograma é representado a escala do coeficiente de similaridade, dentro do campo 0-1. Na parte superior são representadas as máquinas do processo. O dendograma é simplesmente uma representação pictórica dos coeficientes de similaridade entre máquinas. Os pontos de união entre os espaços no dendograma indicam o grau de similaridade dos grupos de máquinas representados pelos espaços.

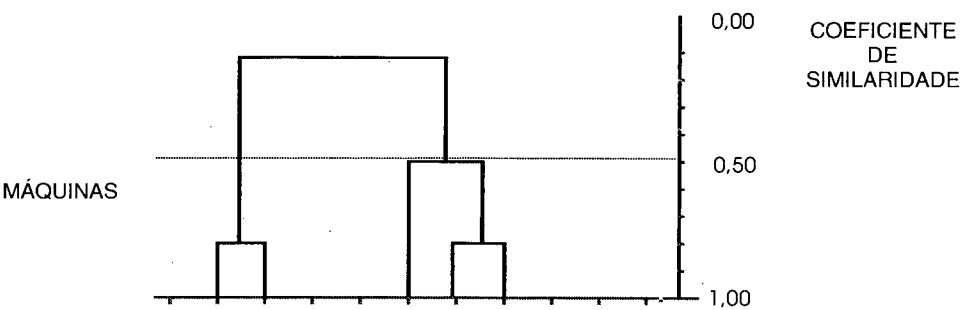


Figura 3.11: Dendograma

Se considerarmos um limite de similaridade como sendo, por exemplo, 0,5, verifica-se a formação de dois agrupamentos principais, como sendo constituído pelas máquinas M₁, M₅, e M₄, M₃, M₂. Ligações de pares de máquinas com baixos coeficientes de similaridades são algumas vezes dominadas por ligações envolvendo as mesmas máquinas com outras máquinas e com altos coeficientes de similaridade.

Os algoritmos baseados no método do coeficiente de similaridade contornam um problema que é facilmente encontrado em arranjos iniciais máquina-peça: a presença de máquinas-gargalo (passíveis de processar maior quantidade de peças em relação às outras máquinas). A propriedade da similaridade entre máquinas permite que a formação das células seja após a identificação dos gargalos, conferindo viabilidade técnica e operacional à sistemas que envolvam muitas máquinas-gargalo. Os algoritmos baseados na ordenação vetorial (ROC, BEA) apresentam este tipo de deficiência, as quais deveriam identificar as máquinas-gargalo duplicando-as e modificando o resultado final da matriz ordenada de modo a torná-la diagonalizada, sem vazios ou elementos excepcionais. Neste caso, o processo usualmente requer análise cuidadosa por parte do programador, tornando-se uma tarefa complicada quando um grande

volume de dados está envolvido (grande matriz de incidência). Outra vantagem do método é a eficiência computacional para o cálculo em grandes matrizes, ao contrário do método ROC e similares (Seifoddini, 1990).

3.2.2 Average Linkage Cluster

O objetivo do Método Average Linkage Clustering – ALCA é determinar um coeficiente médio de similaridade entre todas as máquinas (equação 3.6), cujo objetivo é superar o problema de encadeamento característico do método SLINK. Encadeamento em matrizes submetidas à arranjos são causadas por células unidas entre si por semelhanças no coeficiente de similaridade, enquanto que outras células permanecem isoladas, em termos de similaridade.

$$S_{ij} = \frac{s_{ij}}{N_i * N_j} \quad (3.6)$$

onde

s_{ij} = somatório dos coeficientes de similaridade aos pares entre todos os membros de dois grupos;

N_i, N_j = número de máquinas nos membros i e j , respectivamente;

S_{ij} = Coeficiente de Similaridade entre os grupos i e j .

3.3 MÉTODOS HEURÍSTICOS

Um método heurístico baseia-se em procedimentos não classificatórios ou de utilização de coeficientes de similaridade, mas, em algum critério estabelecido como gerador de agrupamentos (Lorini, 1990). A principal desvantagem dos métodos baseados na análise hierárquica reside no fato de que, quando dois pontos (vetores de linhas e colunas) são agrupados juntos no mesmo estágio do algoritmo não há maneira de voltar atrás, mesmo que o andamento conduza à um arranjo não ideal ao final do processo. Além do mais, procedimentos heurísticos não requerem grande quantidade de dados armazenados computacionalmente, como índices de similaridade ou

dissimilaridade. As principais metodologias segundo procedimentos heurísticos são apresentadas a seguir.

3.3.1 Modelo Multi-Objetivo através do Recozimento Simulado

Nesta metodologia, o modelo de Recozimento Simulado (Su e Hsu,1998) é utilizado para obter uma solução de formação de famílias de peças e células de máquinas. O processo de Recozimento Simulado é um método de pesquisa geral para a otimização de problemas, baseado na randomização controlada de um processo, criado inicialmente por Metropolis *et al.*(1953). Basicamente, a idéia geral é centrada no processo industrial de recozimento de peças metálicas, no qual um sistema é forçado a atingir o seu nível mínimo de energia através do resfriamento controlado de peças metálicas. O processo de recozimento consiste: (1) no alcance da temperatura do sistema até um determinado nível; (2) na manutenção desta temperatura em um determinado nível por um período pré-determinado e, (3) na redução controlada da temperatura até um determinado patamar, onde a quantidade de energia gerada é requerida. O processo incorpora uma grande quantidade de aspectos relacionados à iteratividade de algoritmos. A aplicação de tais algoritmos requerem alguns pré-requisitos, tais como a configuração de uma solução, uma função objetiva (nível estabelecido de energia), um mecanismo de geração e o programa propriamente dito de recozimento. Para cada configuração, geração de mecanismos definem um conjunto de todas as configurações que pode ser atingidas a partir da configuração inicial, em uma transição. Logo, o programa de recozimento consiste (1) na temperatura inicial, (2) na função resfriamento, (3) na definição do número de iterações para cada temperatura atingida e,(4) no critério de parada para o algoritmo. Lundy e Mees (1986) provaram que os algoritmos baseados no Recozimento Simulado convergem para uma solução ótimo com uma probabilidade próxima de um, desde que certas hipóteses sejam levadas em consideração.

Tendo em vista as características da metodologia do Recozimento Simulado, Su e Hsu em seu artigo (1998) adaptaram-a à resolução do problema de formação de famílias de peças e células de máquinas, juntamente com alguns atributos do Algoritmo Genético (Darwin, 1895; Pereira, 1994). Assim, o algoritmo proposto para o projeto de sistemas de manufatura celular considera diferentes critérios, como por exemplo, a maximização da utilização de máquinas, a flexibilidade, balanceamento da carga de máquinas, bem como a minimização total dos custos e a redução de movimentos intracelulares. Alguns objetivos podem conflitar uns com os outros. Assim, a otimização simultânea de muitos objetivos é uma tarefa difícil. O objetivo principal do algoritmo é a redução de custos de transporte e balanceamento da carga de trabalho das máquinas, com o foco principal no segundo objetivo. O problema de formação de famílias de peças e células de máquinas é formulado como se segue:

Minimizar:

- (a) Custos totais (investimento de máquinas e custos de transporte de peças;
- (b) Balanceamento da carga de trabalho intercelular;
- (c) Balanceamento da carga de trabalho intracelular

Sujeito a:

- (a) Cada máquina ser designada à somente uma célula de manufatura;
- (b) Cada operação ser executada em somente uma máquina;
- (c) Cada célula de manufatura é designada à somente uma célula no layout fabril;
- (d) Restrições na capacidade da máquina e;
- (e) Limitação no número total de máquinas em cada célula.

3.3.2 FACT (Fuzzy art with Add Clustering Technique)

A metodologia FACT (Fuzzy art with Add Clustering Technique), apresentada por Kamal em seu artigo (1996) soluciona problemas de formação de famílias de peças e células de máquinas através de redes neurais. A idéia é baseada teoria lógica integral, a qual oferece soluções exequíveis para muitos problemas inerentes à tecnologia de grupo, e que possui as seguintes características:

- 1) Pode aceitar entradas contínuas tais como pesos, comprimentos, volumes de produção e tempos de processamento de peças nas máquinas;
- 2) Cria famílias de peças e células de máquinas simultaneamente;
- 3) É aplicada à problemas não estruturadas com condições indesejáveis (por exemplo, máquinas compartilhadas por diversas peças;
- 4) Suas características computacionais a capacitam à problemas de agrupamentos de tamanho real;
- 5) Determina a alocação de uma peça à uma família sem desordenar demais peças;
- 6) Cria novas famílias de peças, mesmo se uma determinada peça não se enquadra em quaisquer famílias já constituídas;
- 7) Não requer um determinado número de famílias de peças.

Em seu trabalho, Kamal (1996) considera fatores chave tais como tempos de processamento das peças nas máquinas e a demanda de cada peça.

3.3.3 Truncated Tree Search

O objetivo da metodologia Truncated Tree Search (Cheng, 1996), é a formação de famílias de peças e máquinas através de um modelo de formulação quadrática 0-1 de otimização de distâncias entre todas as máquinas. A metodologia consiste em examinar sistematicamente “nós” selecionados em um diagrama de pesquisa, na busca da solução ótima. Cada “nó” da árvore significa um estágio do algoritmo, o qual representa a

alocação de uma máquina à uma das células, onde são testadas todas as combinações possíveis célula-máquina. Um exemplo de como o método é transcorrido é mostrado na figura 3.12, onde aos sucessivos níveis do algoritmos são atribuídos pesquisas de funções de otimização.

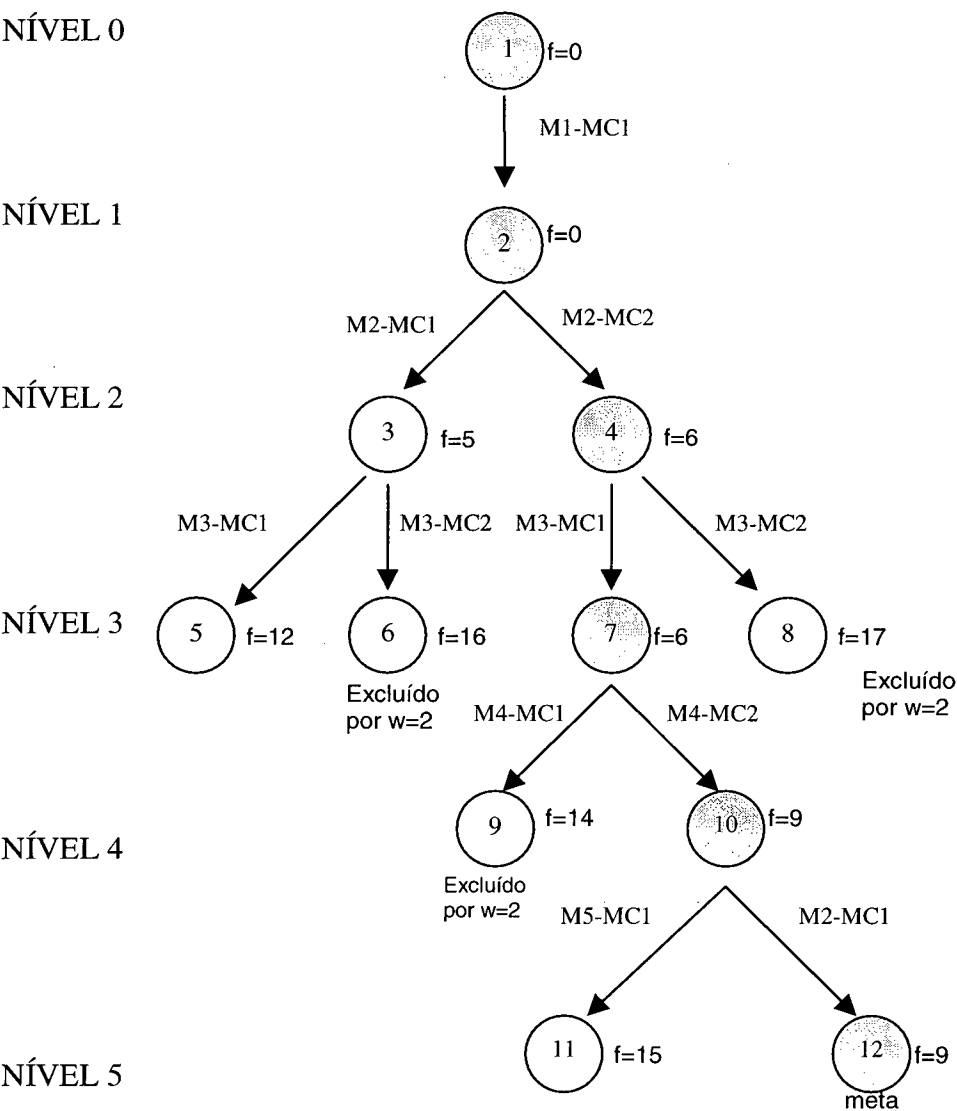


Figura 3.12: Exemplo de pesquisa de nós (Fonte: Cheng, 1996)

Como mostra a figura 3.12, o algoritmo nada mais é que uma árvore de pesquisa, onde busca-se os melhores valores de uma função pré-definida de otimização.

Os atributos de cada “nó” são:

- NÍVEL i = representa o processo de alocação da i -ésima máquina à uma das p células, que o usuário definirá;
- k = uma das p células à qual a máquina i foi designada:
- $M_i - MC_k$ = processo de designação da máquina i à célula (MC) k ;
- função distância $f(q_i)$, onde:

$f(q_i)$ = mínima distância entre o nó origem e o nó meta = $g(q_i) + h(q_i)$

$g(q_i)$ = mínima distância entre o nó origem e o nó avaliado

$h(q_i)$ = mínima distância entre o nó avaliado e o nó meta.

A metodologia de formação de famílias de peças e células de máquinas é dividida em duas partes. A primeira etapa designa máquinas à cada célula, devendo-se obedecer aos seguintes pré-requisitos:

$$\min f(q_i) = \min [g(q_i) + h(q_i)], \text{ onde} \quad (3.7)$$

$$h(q_i) = \sum_{i=q+1}^m \min_{1 \leq k \leq p} \sum_{j=1}^q d_{ij} x_{ik} x_{jk} \quad (3.8)$$

$$g(q_i) = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \sum_{k=1}^p d_{ij} x_{ik} x_{jk} \quad (3.9)$$

$$s.a. \sum_{i=1}^m x_{ik} \leq G_k, \quad \forall k \quad (3.10)$$

$$\sum_{k=1}^p x_{ik} = 1, \quad \forall i \quad (3.11)$$

$$x_{ik} = 0,1, \quad \forall i, k \quad (3.12)$$

onde:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a peça } t \text{ usa a máq. } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$d_{ij} = \sum_{t=1}^n \delta(a_{it}, a_{jt}) \quad (3.13)$$

$$\delta(a_{it}, a_{jt}) = \begin{cases} 1, & \text{se a máquina } i \text{ usa a célula } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{se } i \neq j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A restrição (3.10) assegura que o número de máquinas G_k é limitado em cada célula k , (3.11) define que cada máquina é designada para apenas uma célula, e a restrição (3.12) determina a integridade do modelo.

A segunda etapa da metodologia consiste em designa peças às células. O modelo matemático de alocação de peças às famílias maximiza as operações dentro de cada célula. Portanto, deve-se obedecer à função.

$$Max \sum_{i=1}^m a_{it} x_{ik} \quad 1 \leq k \leq p \quad (3.14)$$

3.3.4 Branch and Bound

O método de agrupamento hierárquico Branch and Bound será o objeto principal de estudo deste trabalho, e será detalhado nos próximos capítulos.

3.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi realizada uma apresentação das principais metodologias para agrupamentos de máquinas em células e peças em famílias. A literatura especializada apresenta uma infinidade de trabalhos na área. O entendimento dos vários algoritmos apresentados neste capítulo é essencial para a compreensão das vantagens do método Branch and Bound, o qual será detalhado no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4- A METODOLOGIA BRANCH AND BOUND

Kattan (1990) propôs uma abordagem heurística usando o método “Branch and Bound” para o agrupamento de peças em famílias, bem como no projeto de células flexíveis de manufatura. O método proposto é baseado na ramificação de uma máquina/posto operativo inicial (semente) e o encadeamento com uma peça. Máquinas iniciais representam o ponto (nó) inicial para a construção do algoritmo (sistema de redes). O selecionamento de uma máquina/posto operativo inicial com o menor número de tarefas a serem cumpridas ajudará a reduzir o tamanho da árvore de procura (rede) e obter mais soluções alternativas, as quais poderão servir de subsídio na elaboração de um centro flexível. As máquinas/postos operativos que são candidatas à duplicação podem ser tanto determinadas pela falta de capacidade de execução de uma tarefa, como também por ser identificadas por um ponto de congestão (gargalo). Burbidge (1988) definiu máquinas gargalo como sendo aquelas que possuem carga de trabalho acima ou muito próximo da capacidade disponível das mesmas, problema que pode ser resolvido pela adição de novas máquinas. Portanto, máquinas/operadores que possuem duas vezes ou mais tarefas que o número médio de tarefas por máquina/operador podem ser consideradas como candidatas à duplicação. Muitos agrupamentos peça-máquina usam a matriz binária de dimensão $M \times N$ (M máquinas com N peças), onde as entradas podem ser valores “1”, indicando que a peça i é processada pela máquina j , ou “0” caso contrário. Esta hipótese é geralmente usada na pesquisa prévia de agrupamentos peça-máquina, omitindo o efeito dos *tempos de set-up*, *tempos de processamento* e o *volume de peças* a ser processado em cada posto operativo (operador ou funcionário). Para o procedimento de solução, o critério inicial introduzido no método proposto é a definição do menor número de tarefas (atividades) por máquina, como a hipótese usualmente usada na pesquisa. Portanto, uma vez a rede de pesquisa inicial é gerada como mostrado no algoritmo, o tempo ideal de cada máquina deverá ser determinado usando-se os tempos de set-up, tempos de processamento e o volume de produção de cada peça. Esta é uma etapa vital no balanceamento da carga de trabalho das células de manufatura.

O desenvolvimento do método é baseado na formulação matemática descrita no item 4.1. Logo após serão descritas as etapas do algoritmo, bem como sua aplicação computacional.

4.1 VARIÁVEIS UTILIZADAS NA DEFINIÇÃO DO ALGORITMO

Para o desenvolvimento do algoritmo, será estabelecida uma convenção, não só utilizada por Kattan em seu trabalho como em todos os trabalhos feitos por autores do assunto, onde as entradas para a matriz de incidência $[A]$ estão identificadas pelo binário a_{ij} . Os índices i e j indicarão respectivamente os contadores de colunas (representado peças do sistema) e os contadores de linhas (representado as máquina do sistema). Considerando que a matriz de incidência poderá assumir quaisquer dimensões iniciais, será necessário definir quantas máquinas e quantas peças irão participar do processo de ordenação/balanceamento, através dos inteiros $M \times N$ respectivamente. De igual dimensão, as matrizes de entradas de tempos de processamento $[T]$, tempos de setup $[S]$ e número de peças processadas por máquina $[Q]$ deverão seguir a mesma convenção de representação de linhas e colunas, apresentadas em números reais, e inteiros, respectivamente. Todos os outros índices do algoritmo são combinações das variáveis definidas anteriormente, a saber:

P_i - representa a i -ésima peça, onde $i = 1, 2, \dots, N$;

M_j - representa a j -ésima máquina/operador, onde $j = 1, 2, \dots, M$;

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a peça } i \text{ usa a máq. } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$T_j = \sum_{i=1}^N a_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, M \text{ máquinas} \quad (4.1)$$

T_j representa o número de peças processadas na máquina j , onde $T_j \in \mathbb{N}$;

K é o número da família de peças ou células, onde $K \in \mathbb{N}$;

$C(K)$ representa o conjunto das máquinas presentes na K -ésima célula;

$F(K)$ representa o conjunto de peças presentes na K -ésima família de peças;

- $\{AM\}$ representa o conjunto de todas as M máquinas presentes no arranjo;
 $\{AP\}$ é o conjunto de todas as N peças a serem produzidas na fábrica;
 $\{B\}$ representa o conjunto de todos as máquinas - gargalo que são candidatos à duplicação;
 N representa o número total de peças;
 M representa o número total de máquinas.

$$\bar{T} = \sum_{j=1}^M T_j / M \quad \text{para todas as } j = 1, 2, \dots, M \text{ máquinas}$$

$$b_j = T_j / \bar{T} \quad \text{critério de adição de uma nova máquina} \quad (4.2)$$

O conjunto B contém todas as máquinas para os $b_j > \beta$, considerando que β será o critério de duplicação de máquinas e definição do número de agrupamentos. Não existe uma correlação específica entre o valor de β e o número de agrupamentos da matriz resultante, uma vez que a grande variabilidade das dimensões e a disposição dos elementos positivos na matriz de incidência dão margem não a um valor fixo, mas a um campo de valores prováveis de atuação. Kattan (1996), em seu trabalho, propõe que o valor de β seja igual a 2. Entretanto, a prática mostra que este valor poderá variar, e deverá ser lançado como uma variável no início do algoritmo, arbitrando-se inicialmente com o valor 2 para teste de formação de agrupamentos. Kattan ainda estabelece uma relação entre os valores de b_j e o número de duplicações de máquinas:

Para $2 < b_j < 3$ existe a possibilidade de adição de uma máquina do tipo j .

Para $3 < b_j < 4$ existe a possibilidade de adição de duas máquinas do tipo j .

Para $4 < b_j < 5$ existe a possibilidade de adição de três máquinas do tipo j .

- t_{ij} representa o tempo de processamento da i -ésima peça na j -ésima máquina;
 q_{ij} representa a quantidade total de i -ésimas peças a serem produzidas na j -ésima máquina;
 S_{ijk} representa o tempo de setup da i -ésima peça produzida na j -ésima máquina, pertencente à k -ésima célula;

I_{jk} é o tempo ideal da j -ésima máquina na k -ésima célula;

AW_{jk} é o tempo total de trabalho disponível da j -ésima máquina na k -ésima célula, onde AW_{jk} depende do número de máquinas j na célula e do número de turnos;

Segundo Kattan (1996), o processo produtivo pressupõe que cada máquina possua um tempo pré-determinado de processamento de todas as peças no período considerado. Normalmente, este período corresponde a um turno de fabricação. Para a metodologia presente, desconsiderar-se-á alguns fatores inerentes às indústrias que estão incluídos em um turno normal de fabricação, como paradas para refeições, treinamentos, ginástica laboral e outras interferências aleatórias.

A formação de células e balanceamento exigirá que certas máquinas sejam duplicadas ou triplicadas dependendo do fator I_{jk} . Para tanto, Kattan determinou que o tempo ideal de cada máquina I_{jk} fosse função do tempo total disponível para processamento das peças (AW_{jk}) e do tempo de setup, conforme a fórmula 3.4. :

$$I_{jk} = AW_{jk} - \sum_{i=1}^{n_k} S_{ijk} - \sum_{j=1}^m t_{ij}^* q_{ij} \quad (4.3)$$

Considerando que em cada estágio K do algoritmo o número de peças presentes em cada vetor $F(K)$ será diferente, este número será indicado pelo inteiro n_k presente na fórmula 4.4

4.2 O ALGORITMO

Para a implementação computacional da metodologia, foi seguida a sequência de etapas proposta no trabalho de Kattan (1996). Todo o trabalho inicia-se na análise do fluxo de produção do layout fabril a ser objeto de pesquisa, onde os parâmetros iniciais tais como o conjunto das máquinas presentes no arranjo fabril e o conjunto total de produtos (peças) a serem fabricados deverão ser coletados. O algoritmo pressupõe a existência de uma linha de produção intermitente, onde os elementos discretos (peças) deverão ser produzidos em postos operativos (máquinas), os quais são relacionados através de uma matriz, denominada Matriz de Incidência.

Os diversos índices presentes ao longo do desenvolvimento são referenciados no item 4.1. As diversas etapas representadas no algoritmo são executadas com base na matriz de Incidência e serão descritas a seguir.

Passo 0: Obter o conjunto de máquinas/postos operativos que são gargalos $\{B\}$. Encontrar todas as máquinas tais que $b_j \geq \beta$. Arbitrar inicialmente $\beta = 2$. Insira todas as máquinas no conjunto $\{AM\}$ e insira todas as peças no conjunto $\{AP\}$.

Estágio I Arbitrar $K=1$ para inicializar a formação da primeira célula de manufatura.

Passo 1: Inicializar o k -ésimo grupo. Fixar $C(K) = \{0\}$ e $F(K) = \{0\}$.

Passo 2: Selecionar o menor valor de T_j para definição da máquina que dará início ao processo de ramificação da rede. Tal máquina chamar-se-á *Nó Origem* (M_s). M_s representará a primeira máquina a ser inserida no conjunto $C(K)$. A determinação do valor mínimo de T_j obedecerá à restrição $T_j \geq 2$, e deverá seguir a ordem crescente de numeração das linhas, caso ocorra valores iguais.

Passo 3: De posse da matriz de Incidência, observar M_s e pesquisar por quais são as peças que são processadas por M_s . Todas as peças que são processadas por M_s deverão ser incorporadas ao conjunto $F(K)$.

Passo 4: Observando todas as peças inseridas no conjunto $F(K)$, verifique que máquinas as processam. Se uma determinada peça é processada por apenas M_s , esta deverá ser desconsiderada nesta etapa. Insira as novas máquinas no conjunto $C(K)$, juntamente com M_s .

Passo 5: Verifique em $C(K)$ se as máquinas presentes em B estão contidas. Nesta etapa, semelhantemente ao que ocorre no Passo 3 deverá ser determinadas as novas peças que comporão o conjunto $F(K)$ em acréscimo às que já existiam antes. Para isto, os elementos de B deverão ser eliminados temporariamente do conjunto $C(K)$, apenas nesta etapa. Ramifique todas as peças que visitam todas as máquinas restantes do conjunto

$C(K)$, de tal maneira que a carga de trabalho nas máquinas dos centros flexíveis seja balanceada.

Passo 6: CRITÉRIO DE FORMAÇÃO PARA O PRIMEIRO CENTRO ALTERNATIVO. Neste passo declare qualquer peça única que requeira uma ou mais máquinas que ainda não estão contidas em $C(K)$ como PEÇAS INICIAIS (SP). No nó SP a rede pode ser quebrada em sub-redes, assim criando mais células alternativas dentro de um grupo de células integrados em uma sistema flexível.

Passo 7: Balanceamento da carga de trabalho intercelular. Primeiro, determine o valor de I_{jk} , o tempo ideal da j -ésima máquina na k -ésima célula para todas as máquinas neste centro, onde $j = 1$ à m_k . A variação do valor de I_{jk} desenvolverá muitas soluções alternativas para cada centro. Obviamente, se I_{jk} for negativo, então a célula requisitará uma j -ésima máquina extra.

Passo 8: Repita os passos 4 à 7 até que todos os nós (máquinas ou peças) tenham sido explorados.

Passo 9: Formar células a partir de todas as máquinas em uma rede fechada $C(K)$. Use uma rede fechada para formar famílias de peças $F(K)$.

Passo 10: Definir o conjunto de máquinas $CC(K) = C(K) - B$. Excluir o conjunto $CC(K)$ de $\{AM\}$. Excluir todas as peças em $F(K)$ de um conjunto $\{AP\}$.

Passo 11: Incrementar K um por vez.

ESTÁGIO K: Repetir os passo de 1 à 10 até que todas as máquinas e peças serem alocadas em uma célula.

CRITÉRIO DE PARADA - O conjunto $\{AP\}$ torna-se vazio.

4.3 EXEMPLO GENÉRICO

O primeiro exemplo é um agrupamento peça-máquina envolvendo 10 peças e 10 máquinas, extraído de Mosier (1985). O sistema resultante dará a oportunidade de selecionar uma alternativa que tem a melhor solução geral com respeito ao número e custo das máquinas usadas, o número e custo dos dispositivos de movimentação de material, e a razão de produção. O método proposto é eficiente e executa uma melhor célula que os algoritmos propostos por outros autores (King,1980; King e Nakornchai, 1982).

4.3.1 Dados de Entrada

A - Matriz de Incidência peça-máquina

A matriz inicial peça-máquina do problema, ou Matriz de Incidência, é apresentada na Figura 4.1, construída com base na *Análise do Fluxo de Produção* fabril, onde determina-se o número de produtos (peças) fabricadas, o total de máquinas disponíveis e os roteiros de produção de cada peça.

Com base na figura 4.1, tem-se:

- Conjunto de Máquinas $AM = \{ M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7, M_8, M_9, M_{10} \}$
- Conjunto de peças $AP = \{ P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10} \}$

[A] =

		PEÇA										
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	T _i
MÁQUINA	M1	1			1		1					3
	M2									1	1	2
	M3		1					1		1	1	4
	M4		1							1	1	3
	M5			1								1
	M6			1					1			2
	M7					1	1					2
	M8		1					1		1		3
	M9								1			1
	M10	1				1	1					3

Figura 4.1: Matriz de Incidência (Fonte: Mosier, 1985)

B - Matriz de Tempos de processamento das peças nas máquinas:

A matriz tempos de processamento das peças em cada máquina (t_{ij}), mostrada na figura 4.2 representa o tempo de processamento de cada peça em determinada estação de trabalho (máquina), com os dados de entrada na unidade de tempo indicada (hora, minuto ou segundo) Para esta matriz, tempos de processamento foram criados aleatoriamente exclusivamente para o desenvolvimento do algoritmo.

[T] =

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
M1	8			5		3				
M2									5	4
M3		3					2		4	6
M4		5							3	3
M5			7							
M6			6					2		
M7					8	9				
M8		4					7		2	
M9								3		
M10	1				2	2				

Figura 4.2: Matriz de tempos de processamentos das peças

C - Matriz de tempos de setup das máquinas:

A Matriz tempos de setup das máquinas (S_{ij}), mostrada na figura 4.3 representará o tempo de troca de ferramentas para cada mudança de peça nas máquinas em que tal fato ocorreu, com os dados de entrada se apresentando em unidades de tempo (hora, minuto ou segundo). Igualmente à matriz de tempos de processamento, os dados foram criados aleatoriamente para o desenvolvimento do exemplo.

[S] =

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
M1	0,5			0,5		0,5				
M2									0,5	0,5
M3		0,5					0,5		0,5	0,5
M4		0,5							0,5	0,5
M5			0							
M6			0,5					0,5		
M7					0,5	0,5				
M8		0,5					0,5		0,5	
M9								0,5		
M10	0,5				0,5	0,5				

Figura 4.3: Matriz de tempos de setup

D - Matriz de tempos disponíveis nas máquinas e matriz de quantidades de peças produzidas em cada máquina:

A Matriz de tempos disponíveis em cada máquina [AW], mostrada na figura 4.4a representa qual o período em cada máquina j está habilitada a produzir. Por exemplo, em um ambiente fabril, este período pode ser considerado como um turno de trabalho. O tempo disponível AW_j deverá ser considerado ocultando-se vários fatores inerentes a um sistema produtivo que interrompem o andamento normal de execução da máquina, como paradas administrativas, treinamentos, quebra ou falta de energia. Portanto, para o presente algoritmo será considerado apenas o tempo total AW_j constituído apenas pelo período produtivo bem como pelos tempos de setup. Se o tempo total AW_j for maior ou igual ao tempo de processamento t_{ij} , um número inteiro de peças q_{ij} deverá ser produzido na máquina j , como mostrado na figura 4.4b. Deve-se considerar também que estes dados foram gerados aleatoriamente para o desenvolvimento do algoritmo.

[AW]=

1000
2000
1500
1600
4000
3000
2500
2900
1000
4000

[Q] =

10			20		30				
								5	10
	20					30		20	60
	30							40	50
		50							
		60					80		
				90	30				
	10					50		40	
							80		
20				50	70				

Figura 4.4a

Figura 4.4b

Figura 4.4: Matriz de tempos disponíveis nas máquinas (4.4a) e matriz de quantidades de peças produzidas em cada máquina(4.4b).

E – Arbitrar critério de formação de agrupamentos $\beta = 2$

4.3.2 Procedimento

Como já definido por Kattan (1996), o algoritmo Branch and Bound baseia-se no estabelecimento de um ponto inicial de partida (máquina inicial) e no relacionamento sucessivo entre tal máquina e as peças que nela são processadas, criando uma árvore de ramificação contendo peças e máquinas. A criação de células será feita pela divisão do algoritmo em vários estágios (K estágios), os quais incorporarão sucessivamente máquinas e peças até o esgotamento total de ambos, situação na qual o algoritmo é finalizado. O algoritmo é dado como se segue:

Passo 0: Obter o conjunto B tal que $b_j \geq 2 \Rightarrow B = \emptyset$

Inserir todas as máquinas no conjunto $\{AM\}$ e todas as peças no conjunto $\{AP\}$

ESTÁGIO1: Configurar $K = 1$

Passo 1: Inicializar o primeiro grupo: $C1 = \{0\}; F1 = \{0\}$

Passo 2: $T_{j \min} = T_2 \Rightarrow C1 = \{M_2\}; T_{j \min} \geq 2$

Passo 3: $F1 = \{P_9, P_{10}\}$

Passo 4: $C1 = \{M_2, M_3, M_4, M_8\}$

Passo 5: $C1 - B = \{M_2, M_3, M_4, M_8\} - \emptyset = \{M_2, M_3, M_4, M_8\}$

$F1 = \{P_2, P_7, P_9, P_{10}\}$

Passo 6: Existe alguma peça que pode ser considerada como ponto de início de uma rede, processando outras máquinas diferentes de $C1$? R : NÃO

$C1 = \{M_2, M_3, M_4, M_8\}$

O próximo passo será o balanceamento da carga de trabalho e redução dos movimentos de materiais em uma célula. Este passo é um incremento da capacidade de utilização geral das células. Uma célula bem balanceada requer informações para os tempos de set-up de cada máquina, tempos de processamento de cada tarefa, o volume de cada peça e o sistema de movimentação de materiais.

$$\text{Passo 7: } I_{jk} = AW_{jk} - \sum_{i=1}^{n_k} S_{ijk} - \sum_{j=1}^{n_k} t_{ij} * q_{ij} \quad K = 1; j \in C1$$

$$\text{Se } I_{jk} < 0, \text{ então } m_k = m_k + 1, q_{ij} = q_{ij}/2 \quad 1 < i < n_1$$

$$I_{j1} = AW_{j1} - \sum_{i=1}^{n_1} S_{ij1} - \sum_{j=1}^{n_1} t_{ij} * q_{ij} \quad K = 1; n_1 = 4$$

$$I_{21} = AW_{21} - [(t_{22} * q_{22}) + (t_{72} * q_{72}) + (t_{92} * q_{92}) + (t_{10,2} * q_{10,2})] - [S_{22} + S_{72} + S_{92} + S_{10,2}]$$

$$I_{21} = 2000 - [(0 * 0) + (0 * 0) + (5 * 5) + (4 * 10)] - [0 + 0 + 0,5 + 0,5]$$

$$I_{21} = 1934$$

$$I_{31} = AW_{31} - [(t_{23} * q_{23}) + (t_{73} * q_{73}) + (t_{93} * q_{93}) + (t_{10,3} * q_{10,3})] - [S_{23} + S_{73} + S_{93} + S_{10,3}]$$

$$I_{31} = 1500 - [(3 * 20) + (2 * 30) + (4 * 20) + (6 * 60)] - [0,5 + 0,5 + 0,5 + 0,5]$$

$$I_{31} = 938,0$$

$$I_{41} = AW_{41} - [(t_{24} * q_{24}) + (t_{74} * q_{74}) + (t_{94} * q_{94}) + (t_{10,4} * q_{10,4})] - [S_{24} + S_{74} + S_{94} + S_{10,4}]$$

$$I_{41} = 1600 - [(5 * 30) + (0 * 0) + (3 * 40) + (3 * 50)] - [0,5 + 0 + 0,5 + 0,5]$$

$$I_{41} = 1178,5$$

$$I_{81} = AW_{81} - [(t_{28} * q_{28}) + (t_{78} * q_{78}) + (t_{98} * q_{98}) + (t_{10,8} * q_{10,8})] - [S_{28} + S_{78} + S_{98} + S_{10,8}]$$

$$I_{81} = 2900 - [(4 * 10) + (7 * 50) + (2 * 40) + (0 * 0)] - [0,5 + 0,5 + 0,5 + 0]$$

$$I_{81} = 2428,5$$

Passo 8: Todas as peças estão completas. Logo o ciclo está fechado.

Passo 9: O primeiro grupo é formado:

$$C1 = \{ M_2, M_3, M_4, M_8 \}$$

$$F1 = \{ P_2, P_7, P_9, P_{10} \}$$

Passo 10: Definir o conjunto de máquinas $CC(1) = C(1) - B$.

$$CC(1) = \{ M_2, M_3, M_4, M_8 \} - \emptyset = \{ M_2, M_3, M_4, M_8 \}$$

$$AM = AM - CC(1) = \{ M_1, M_5, M_6, M_7, M_9, M_{10} \}$$

$$AP = \{ P_1, P_3, P_4, P_5, P_6, P_8 \}$$

Passo 11: $K = K + 1$

A evolução de desenvolvimento da formação da célula pode ser acompanhada através dos diagramas de rede mostrados nas figuras 3.5, 3.6. e 3.7.

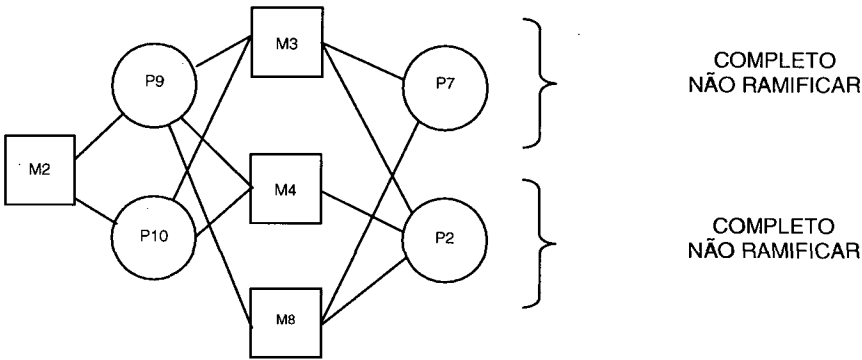


Figura 4.5: Diagrama de redes para a primeira célula

ESTÁGIO 2: $K = 2$

Passo 1: Inicializar o segundo grupo: $C2 = \{0\}; F2 = \{0\}$

Passo 2: $T_{j \min} = T_2 \Rightarrow C2 = \{M_6\}; T_{j \min} \geq 2$

Passo 3: $F1 = \{P_3, P_8\}$

Passo 4: $C1 = \{M_5, M_6, M_9\}$

Passo 5: $C1 - B = \{M_5, M_6, M_9\} - \emptyset = \{M_5, M_6, M_9\}$
 $F1 = \{P_3, P_8\}$

Passo 6: Existe alguma peça que pode ser considerada como ponto de início de uma rede? R : NÃO

Passo 7: $I_{j2} = AW_{j2} - \sum_{i=1}^{n_2} S_{ij2} - \sum_{j=1}^{n_2} t_{ij} * q_{ij}$ $K = 2; n_2 = 2$

$$I_{52} = AW_{52} - [(t_{35} * q_{35}) + (t_{85} * q_{85})] - [S_{35} + S_{85}]$$
$$I_{52} = 4000 - [(7 * 50) + (0 * 0)] - [0,5 + 0]$$
$$I_{52} = 3649,5$$

$$I_{62} = AW_{62} - [(t_{36} * q_{36}) + (t_{86} * q_{86})] - [S_{36} + S_{86}]$$
$$I_{62} = 3000 - [(6 * 60) + (2 * 80)] - [0,5 + 0,5]$$

$$I_{62} = 2479,0$$

$$I_{92} = AW_{92} - [(t_{39} * q_{39}) + (t_{89} * q_{89})] - [S_{39}+S_{89}]$$

$$I_{92} = 1000 - [(0 * 0) + (3 * 80)]- [0 +0,5]$$

$$I_{92} = 759,5$$

Passo 8: Todas as peças estão completas. Logo o ciclo está fechado.

Passo 9: O segundo grupo é formado:

$$C2 = \{M_5, M_6, M_9\}$$

$$F2 = \{P_3, P_8\}$$

Passo 10: Definir o conjunto de máquinas $CC(2) = C(2) - B$.

$$CC(2) = \{ M_5, M_6, M_9 \} - \emptyset = \{M_5, M_6, M_9\}$$

$$AM_2 = AM - CC(2) = \{ M_1, M_7, M_{10} \}$$

$$AP_2 = \{P_1, P_4, P_5, P_6\}$$

Passo 11: $K = K + 1$

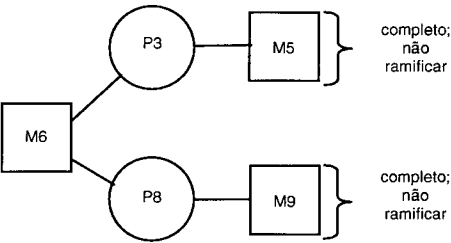


Figura 4.6: Diagrama de redes para a segunda célula

ESTÁGIO 3: K = 3

Passo 1: Inicializar o terceiro grupo: $C3 = \{0\}$; $F3 = \{0\}$

Passo 2: $T_{j \min} = T_1 \Rightarrow C3 = \{M_7\}$; $T_{j \min} \geq 2$

Passo 3: $F3 = \{P_5, P_6\}$

Passo 4: $C3 = \{M_1, M_7, M_{10}\}$

Passo 5: $C3 - B = \{ M_1, M_7, M_{10} \} - \emptyset = \{ M_1, M_7, M_{10} \}$

$$F1 = \{ P_1, P_4, P_5, P_6 \}$$

Passo 6: Existe alguma peça que pode ser considerada como ponto de início de uma rede? R: NÃO

Passo 7: $I_{j3} = AW_{j3} - \sum_{i=1}^{n3} S_{ij3} - \sum_{j=1}^{n3} t_{ij} * q_{ij} \quad K = 3; n_3 = 4$

$$I_{13} = AW_{12} - [(t_{11} * q_{11}) + (t_{41} * q_{41}) + (t_{51} * q_{51}) + (t_{61} * q_{61})] - [S_{11} + S_{41} + S_{51} + S_{61}]$$

$$I_{13} = 1000 - [(8 * 10) + (5 * 20) + (0 * 0) + (3 * 30)] - [0,5 + 0,5 + 0 + 0,5]$$

$$I_{13} = 728,5$$

$$I_{73} = AW_{73} - [(t_{17} * q_{17}) + (t_{47} * q_{47}) + (t_{57} * q_{57}) + (t_{67} * q_{67})] - [S_{17} + S_{47} + S_{57} + S_{67}]$$

$$I_{73} = 2500 - [(0 * 0) + (0 * 0) + (8 * 90) + (9 * 30)] - [0 + 0 + 0,5 + 0,5]$$

$$I_{73} = 1509,0$$

$$I_{10,3} = AW_{10,3} - [(t_{1,10} * q_{1,10}) + (t_{4,10} * q_{4,10}) + (t_{5,10} * q_{5,10}) + (t_{6,10} * q_{6,10})] - [S_{1,10} + S_{4,10} + S_{5,10} + S_{6,10}]$$

$$I_{10,3} = 4000 - [(1 * 20) + (0 * 0) + (2 * 50) + (2 * 70)] - [0,5 + 0 + 0,5 + 0,5]$$

$$I_{10,3} = 3738,5$$

Passo 8: Todas as peças estão completas. Logo o ciclo está fechado.

Passo 9: O terceiro grupo é formado:

$$C3 = \{ M_1, M_7, M_{10} \}$$

$$F3 = \{ P_1, P_4, P_5, P_6 \}$$

Passo 10: Definir o conjunto de máquinas $CC(3) = C(3) - B$.

$$CC(3) = \{ M_1, M_7, M_{10} \} - \emptyset = \{ M_1, M_7, M_{10} \}$$

$$AM = AM_3 - CC(3) = \emptyset$$

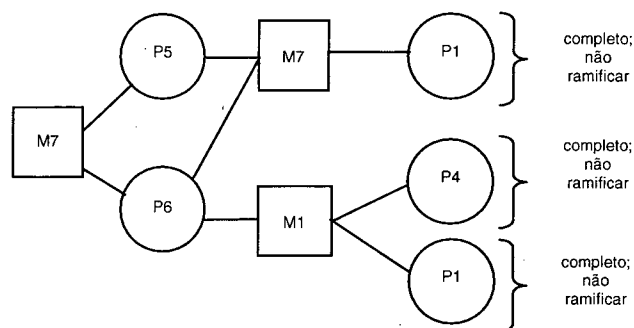


Figura 4.7: Diagrama de redes para a terceira célula

4.3.3 Resultado Matricial

A relação a seguir apresenta os grupos de células candidatas formadas. Os grupos de máquinas formadas são:

- (1) máquinas 2, 3, 4, 8;
- (2) máquinas 5, 6, 9;
- (3) máquinas 1, 7, 10.

As correspondentes famílias de peças são as seguintes:

- (4) peças 2, 7, 10, 9;
- (5) peças 3, 8;
- (6) peças 1, 4, 5, 6.

A figura 4.8 representa o resultado matricial para o algoritmo desenvolvido, visualizando uma configuração possível para o sistema final a ser implementado. A Matriz de Incidência inicial mostrada na figura 4.1 foi dividida em três grandes subgrupos, caracterizando as famílias de peças e células de máquinas. Obviamente, acordo com o roteiro de produção, poderá haver vazios (peças não processadas por uma determinada máquina) ou elementos excepcionais (peças processadas por uma máquina fora de sua célula) no arranjo final, indicando deficiências no agrupamento. Observe que dentro de cada célula poderá haver várias subconfigurações de ordenação entre

máquinas e peças, otimizado-se fatores de eficiência de agrupamentos dentro de cada grupo. O algoritmo não prevê esta fase de otimização do fluxo, embora seja possível ser feita uma nova implementação do algoritmo para cada célula, tratando-a como se fosse uma Matriz de Incidência particular. É claro que isto deverá ser feito para grandes matrizes, onde o processo de análise manual torna-se penoso.

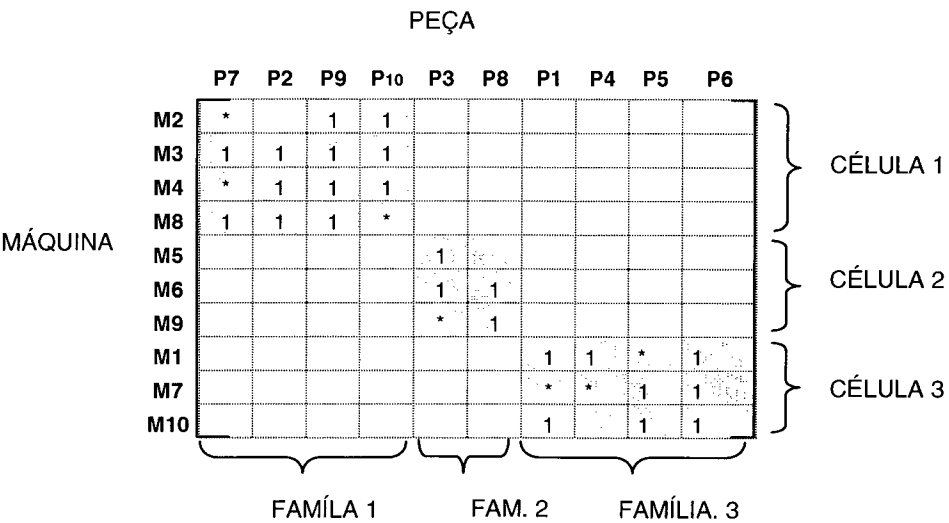


Figura 4.8: Matriz Resultante

A disposição final das máquinas dentro de uma célula dependerá ainda de alguns fatores que poderão intervir na organização de máquinas, como dispositivos de movimentação (pallets, transportadores) bem como nos detalhes do layout fabril. O custo de aquisição das máquinas poderá ser um fator relevante durante o novo projeto.

4.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O Capítulo 4 apresentou a descrição passo a passo da metodologia Branch and Bound para a formação de famílias de peças e células de máquinas, bem como para balanceamento da carga de trabalho entre máquinas. Observa-se a simplicidade no processo de formação de famílias e balanceamento da carga de trabalho nas máquinas através da análise de redes, características importantes na agilidade computacional durante a execução do programa. As etapas apresentadas neste capítulo servirão de subsídio para a implementação computacional do programa, visto no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5- IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Desenvolvida a metodologia para o planejamento de células de fabricação, voltada para uma implementação informatizada, cabe agora desenvolver um sistema protótipo para executá-la.

Um sistema para projetar células de produção auxiliado por computador, do tipo que se pretende construir, deve ter a característica de ser o mais fácil possível de se trabalhar, possuindo uma interface amigável com o usuário. É com este objetivo que foi desenvolvido todo o sistema.

5.1 MODULO DE CADASTRAMENTO

Para a entrada de dados para a execução do algoritmo, foi desenvolvido dois banco de dados: Módulo de Cadastramento de Simulações, Módulo Máquinas e Peças a Processar, e o Módulo Tempo Disponível nas Máquinas, os quais serão descritos a seguir.

5.1.1 Módulo de Cadastramento de Simulações

O arquivo “Cadastramento de Simulações” contém o registro das várias simulações, ou processos individuais de formação de famílias de peças e células de máquinas. Neste arquivo cada simulação é codificada por um algarismo, onde deve-se lançar os dados de número de peças e máquinas presentes no sistema, bem como o fator de agrupamento necessário para a configuração das células.

5.1.2 Modulo Máquinas e Peças a Processar

O arquivo Máquinas e Peças a Processar contém referência aos roteiros de produção, estabelecendo-se o relacionamento entre máquinas e peças. Simultaneamente ao lançamento dos roteiros de produção, são lançados tempos de processamento, tempos de setup e quantidade de peças.

5.1.3 Modulo Tempo Disponível nas Máquinas

O arquivo Tempo Disponível nas Máquinas contém todos os tempos totais de produção disponíveis em cada máquina.

5.2 FLUXOGRAMA DO PROCESSO

A seqüência de passos da construção computacional do algoritmo é apresentada na figura 5.1, a qual teve como base toda as etapas já descritas no item 4.2. Toda a metodologia de construção parte de dados iniciais como a matriz de incidência, matriz de entrada de tempos de processamento das peças nas máquinas, quantidade de peças fabricadas, tempos de setup antes da formação de células e tempos totais disponíveis. Para possibilitar uma dimensão qualquer $n \times m$ na matriz de incidência, o algoritmo permite a entrada dos inteiro M e N , dando margem ao cálculo de agrupamento e balanceamento de sistemas com m máquinas \times n peças.

Uma vez os dados lançados no sistema, as etapas seguintes decorrem dos cálculos previamente estabelecidos no item 4.2, os quais resultam em parâmetros como T_j e B .

5.3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Para a implementação computacional do algoritmo, objetivou-se idealizar um sistema que possuísse uma grande interface com o usuário, de modo a permitir ajuste de quaisquer dados de entrada por ocasião do lançamento, com grande facilidade de domínio sobre o sistema. Para isso, escolheu-se para efetivar a execução o Delphi 4.0, que viabiliza todos os pré-requisitos para um sistema como grande interface com o usuário, já que utiliza a plataforma Windows para operacionalização. O Delphi é um ambiente de programação que permite a criação de aplicativos com interface Windows, gerando arquivos executáveis rápidos. O Delphi possui muitas potencialidades em criar aplicações para Windows, além de ser fácil de usar, e também é uma ferramenta de programação que permite produzir aplicações poderosas, com um mínimo de código.

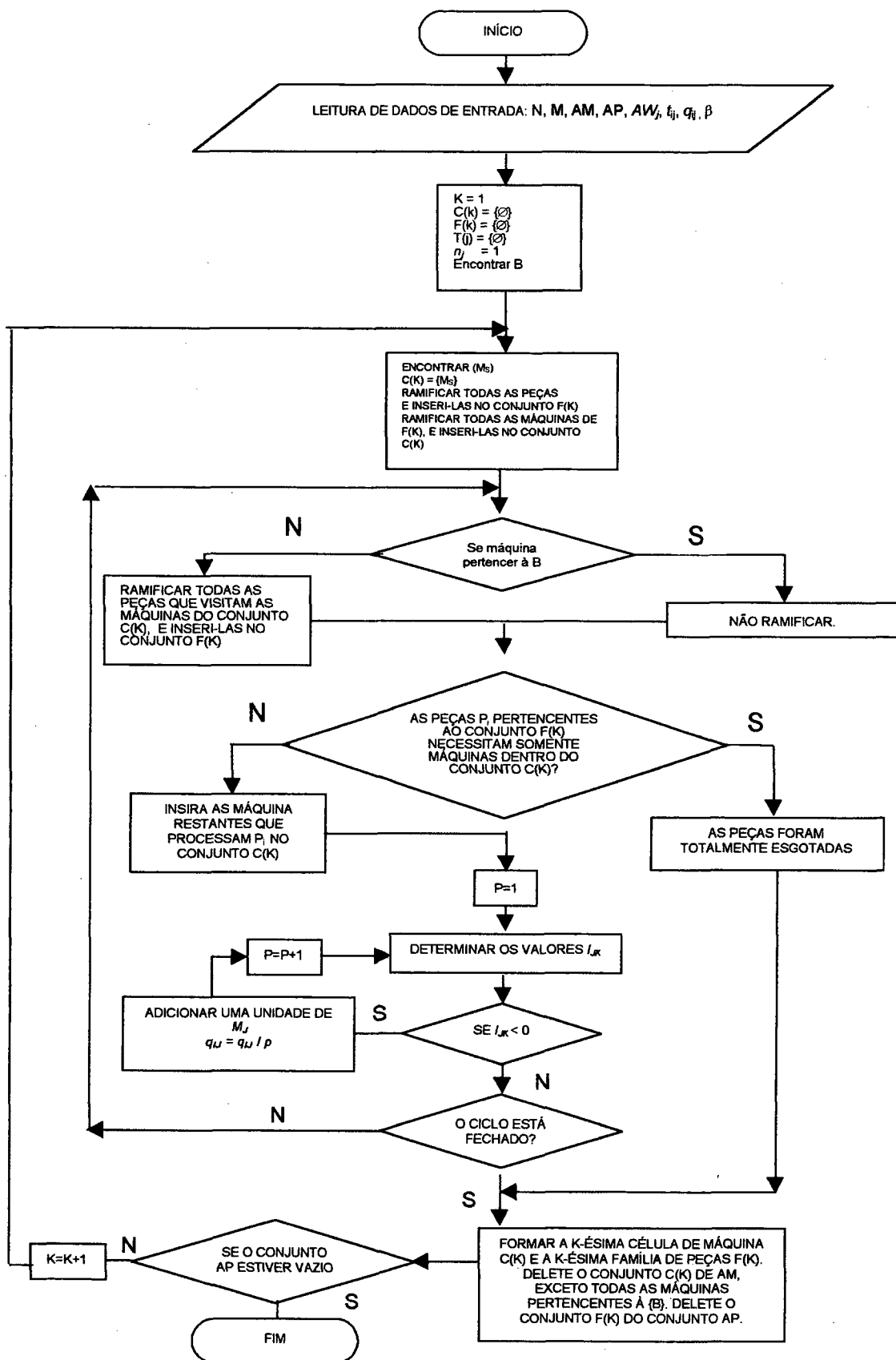


Figura 5.1: Fluxograma para formação de células e balanceamento

A tela inicial do programa é visualizada na figura 5.2. A plataforma Windows representa um grande avanço em relação aos sistemas que utilizavam o sistema operacional DOS como base para a execução dos programas. É recomendável que se utilize para a instalação do programa a linha de processadores Pentium I, II ou III de modo a permitir a rapidez e agilidade no processamento, principalmente quando for exigido o cálculo para grandes matrizes. A geração de arquivos para instalação do programa de formação de células e balanceamento possibilitou total adequação com a plataforma Windows para os procedimentos de instalação e desinstalação do programa.

O software apresenta um menu principal dispondo de comandos para simulação do algoritmo, e entre outros, acessórios que possibilitam auxílio operacional ao longo da entrada de dados, como calculadora e calendários. É permitido ao usuário acrescentar atalhos para os diversos comandos presentes no menu principal, na tela principal do programa, representada na figura 5.2.

Uma vez acessada a tela do menu principal, é possível iniciar o cadastramento de várias simulações pelo usuário. Um banco de dados específico possibilita a nomeação de cada simulação a ser executada, procedendo-se na entrada de dados para dimensionamento da matriz de incidência. Para várias simulações distintas, é possível

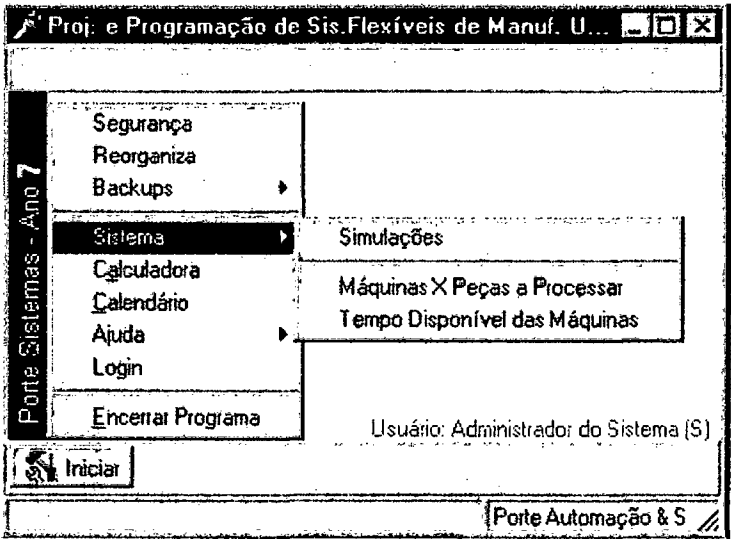


Figura 5.2: Menu principal

criar classificações de pesquisa de modo a facilitar a procura e execução. A busca de uma determinada simulação é baseada em parâmetros, tais como ordem alfabética. A tela representada na figura 5.3 representa o banco de dados de cadastramento de

simulações. Cada simulação é codificada através de um número (“Código da simulação”), que indica a quantidade de simulações realizadas desde o momento da

Cadastro de Simulações	
Código da Simulação:	1
Simulação:	Simula 1
Data:	02/12/1999
Qtd. de Máquinas:	6
Qtd. de Peças:	5
Fator de Agrupamento:	0.90
Obs:	

Maquinas X Peças Tempo Disponível das Máquinas (AW)

Fechar

Figura 5.3: Banco de dados para cadastramento de simulações

instalação do software, bem como ser nomeada no campo “Simulação”. Simultaneamente, deve-se entrar com o número de máquinas e peças presentes no sistema, que definirá a dimensão da matriz binária de entrada e o fator de agrupamento, que definirá quantas células o sistema final apresentará. Como mostrado na figura 5.3, a simulação cadastrada é representada pelo dígito “1”, no campo “Código da simulação”. No campo “Simulação” pode-se nomear a simulação (Simula 1), nos dois campos subsequentes (número de máquinas e número de peças) lançam-se os dados em números inteiros e, no campo Fator de Agrupamento lança-se o valor de β , em número real. Se o usuário desejar, podem ser feitos comentários adicionais no campo “Obs.”.

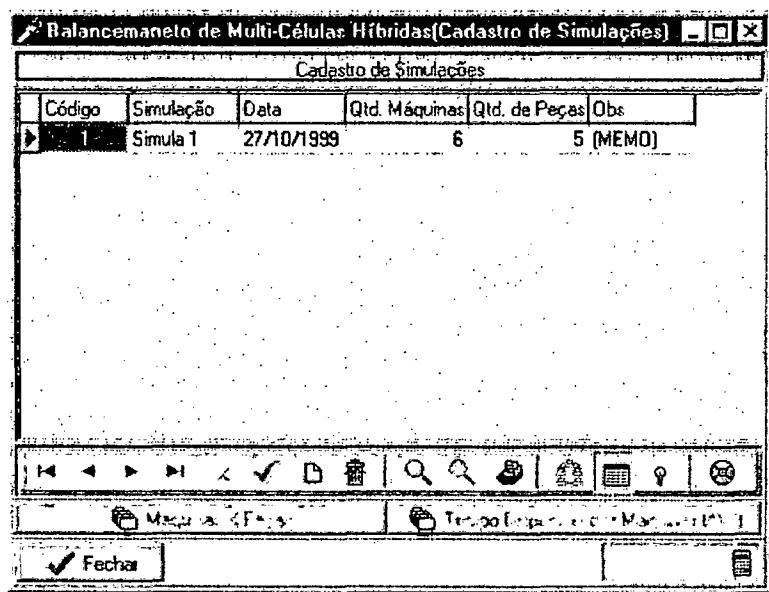


Figura 5.4: Cadastro de simulações

Uma vez lançados os dados iniciais do sistema, todas as simulações podem ser visualizadas em uma planilha, a qual contém todos os registros contidos ordenadamente, conforme mostra a figura 5.4.

O lançamento dos dados para designação de peças às máquinas é executado no passo a seguir. Toda a estrutura do programa foi desenvolvida com a possibilidade de reparação de erros de lançamento de dados, através de caixas de diálogo conforme mostra a figura 5.5. Juntamente como a designação de peças às máquinas, são lançados os dados para tempo de processamento das peças nas máquinas, quantidade de peças executadas e tempos de setup antes da formação das famílias.

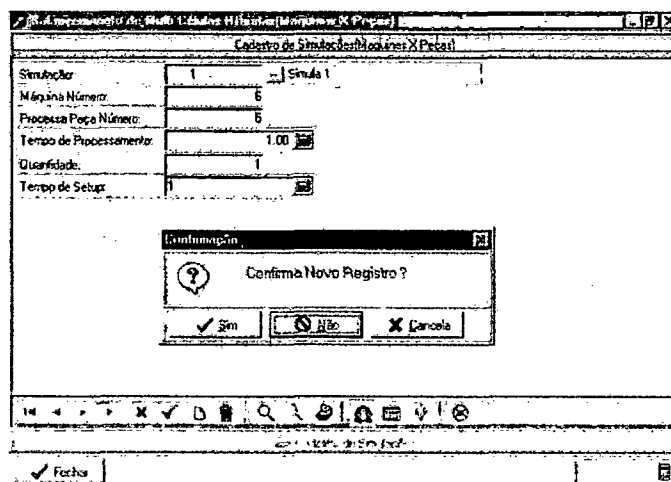


Figura 5.5: Designação de peças às máquinas, tempos de processamento, setup e quantidade de peças

Uma vez lançados os dados, todos os registros são armazenados em um banco de dados visualizável através da figura 5.6. A fim de que se possa corrigir eventuais erros por parte do usuário no lançamento, a barra de ferramenta inferior possibilita a inserção ou deleção de registros facilmente, cujos comandos são descritos na figura 5.8.

Simulação	Máquina	Peça	Tempo	Quantidade	Setup
1	Simula 1	1	3	1	1
1	Simula 1	1	5	1	1
1	Simula 1	2	2	1	1
1	Simula 1	2	4	1	1
1	Simula 1	3	1	1	1
1	Simula 1	3	2	1	1
1	Simula 1	3	4	1	1
1	Simula 1	4	3	1	1
1	Simula 1	4	5	1	1
1	Simula 1	5	1	1	1
1	Simula 1	5	4	1	1
1	Simula 1	6	5	1	1

Figura 5.6: Banco de dados em forma de planilha

Analogamente ao cadastramento de roteiros de peças, tempos e quantidades de peças, o tempo total disponível em cada máquina é lançado separadamente em um banco de dados conforme mostra a figura 5.7, contando com os mesmos recursos apresentados anteriormente.

Simulação: 1 Simula 1

Máquina: 1

Tempo Total Disponível: 10

Figura 5.7: Cadastramento de tempos disponíveis de processamento para as máquinas

Uma vez lançados todos os dados necessários à simulação, é possível executá-la através de um comando específico, como mostra a figura 5.8

Tão logo seja executada a simulação, deve-se indicar de que forma os resultados podem ser apresentados. O programa permite a saída do resultado geral através de uma matriz binária indicando as famílias de peças e células de máquinas, o qual pode ser apresentados sob três formas:

- visualização de Impressão (Print Preview);
- direcionamento para algum arquivo de texto (*.TXT);
- saída diretamente para a impressora.

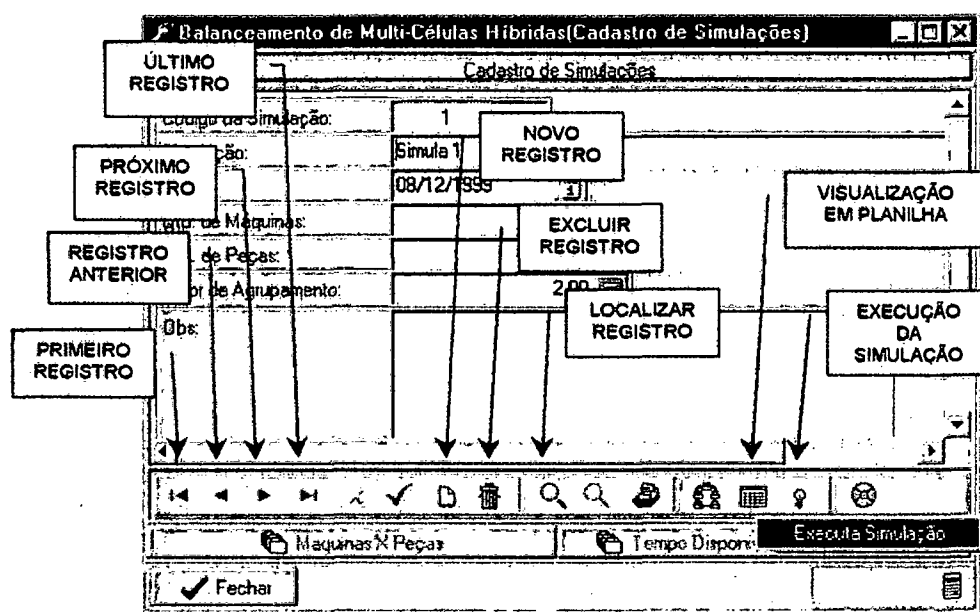


Figura 5.8: Comandos do menu principal e execução da simulação

A interface com arquivos do tipo texto permite a edição do resultado final, o que é desejável quando se trabalha com outros tipos de software. A tela de opção de saída é apresentada na figura 5.9.

Se o usuário desejar visualizar a matriz ordenada na tela, a matriz resultante apresentada na figura 5.10 é mostrada. A tela permite a visualização da matriz ordenada para qualquer que seja a dimensão final (observado o limite imposto pelo algoritmo),

sendo permitida a impressão direta da tela, ou direcionamento para algum arquivo tipo texto de modo a tornar possível a edição.

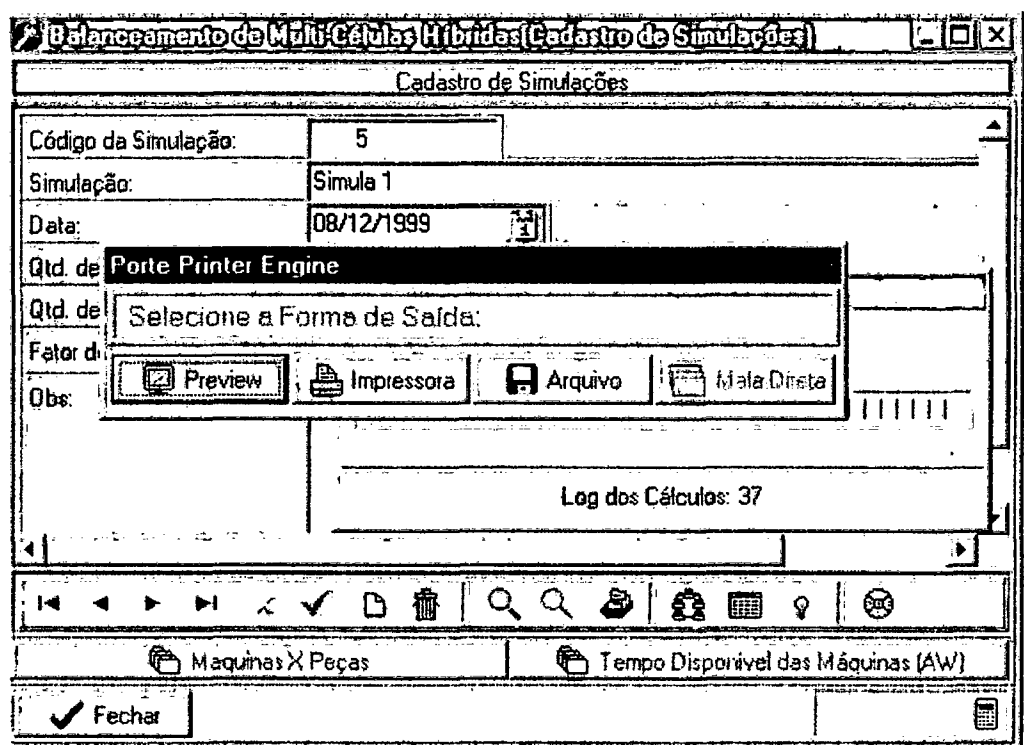


Figura 5.9: Seleção da forma de saída dos resultados

Após a exibição da matriz resultante, é aberta uma caixa de diálogo solicitando ao usuário a exibição do “Log dos Cálculos”, cuja função é visualizar as etapas descritas no item 4.2, conforme mostra a tabela 5.1. Da mesma forma que a matriz resultante, o arquivo “Log dos Cálculos” pode ser direcionado para a visualização de impressão (não editável), impressão ou arquivo de texto para edição. No arquivo “Log dos Cálculos”, é mostrado os seguintes itens:

- soma dos elementos positivos da matriz de incidência para cada linha T_j ;
- os valores dos fatores de agrupamento b_j ;
- o valor de \bar{T}_j ;
- o valor mínimo de T_j ;
- os passos 3 à 7, conforme item 3.3;
- as máquinas restantes após a formação de cada célula, e;
- as peças restantes após a formação de cada família.

ORTE PrintPreview v1.12

<< < > >> [Print] [Save] [Find] [Help]

Matriz Resultante

Emissão: 09/12/1999 (10:53h)

	PC3	PC5	PC2	PC4	PC1
M1	1	1			
M4	1	1			
M6		1			
M2			1	1	
M3			1	1	1
M5				1	1

Página 1/1

Figura 5.10: Visualização de impressão da matriz resultante

A visualização do arquivo “Log dos Cálculos” é de grande valia no monitoramento do desempenho dos algoritmo, o qual elucida cada passo até a chegada à solução final. Permite também, o acompanhamento de todos os cálculos, sendo de grande utilização na possível expansão e adaptação ao cálculo de novas variáveis.

Tabela 5.1 Arquivo Log dos Cálculos

Log dos Cálculos

Emissão: 27/10/1999 (18:29h)

Ocorrência

Mensagem

```

0000-27/10/1999,18:25:15|Tj[1] =2
0001-27/10/1999,18:25:15|Tj[2] =2
0002-27/10/1999,18:25:15|Tj[3] =3
0003-27/10/1999,18:25:15|Tj[4] =2
0004-27/10/1999,18:25:15|Tj[5] =2
0005-27/10/1999,18:25:15|Tj[6] =2
0006-27/10/1999,18:25:15|TBrr := 2.166666666666667
0007-27/10/1999,18:25:15|Bj[1] =0.923076923076923
0008-27/10/1999,18:25:15|Bj[2] =0.923076923076923
0009-27/10/1999,18:25:15|Bj[3] =1.38461538461538
0010-27/10/1999,18:25:15|Bj[4] =0.923076923076923
0011-27/10/1999,18:25:15|Bj[5] =0.923076923076923
0012-27/10/1999,18:25:15|Bj[6] =0.923076923076923
0013-27/10/1999,18:25:16|Mínimo Tj >= 2 = M1
0014-27/10/1999,18:25:16|Passo 4: F[K] = 3, 5,
0015-27/10/1999,18:25:16|Passo 4: C[K] = 1, 4, 6,
0016-27/10/1999,18:25:16|Passo 5: F[K] = 3, 5,
0017-27/10/1999,18:25:16|Passo 5: C[K] = 1, 4, 6,
0018-27/10/1999,18:25:17|Passo 7: Ij = 6, 6, 7,
0019-27/10/1999,18:25:17|Após Passo 7: C[K] = 1, 4, 6,
0020-27/10/1999,18:25:17|Após Passo 9: C[K] = 1, 4, 6,
0021-27/10/1999,18:25:17|Após Passo 9: F[K] = 3, 5,
0022-27/10/1999,18:25:17|Máquinas Restantes: 2, 3, 5,
0023-27/10/1999,18:25:17|Peças Restantes: 1, 2, 4,
0024-27/10/1999,18:25:17|##### FIM da Iteração 1
0025-27/10/1999,18:25:17|Mínimo Tj >= 2 = M2
0026-27/10/1999,18:25:18|Passo 4: F[K] = 2, 4,
0027-27/10/1999,18:25:18|Passo 4: C[K] = 2, 3, 5,
0028-27/10/1999,18:25:18|Passo 5: F[K] = 2, 4, 1,
0029-27/10/1999,18:25:18|Passo 5: C[K] = 2, 3, 5,
0030-27/10/1999,18:25:18|Passo 7: Ij = 5, 4, 5,
0031-27/10/1999,18:25:18|Após Passo 7: C[K] = 2, 3, 5,
0032-27/10/1999,18:25:18|Após Passo 9: C[K] = 2, 3, 5,
0033-27/10/1999,18:25:18|Após Passo 9: F[K] = 2, 4, 1,
0034-27/10/1999,18:25:18|Máquinas Restantes:
0035-27/10/1999,18:25:18|Peças Restantes:
0036-27/10/1999,18:25:18|##### FIM da Iteração 2

```

37 Itens Listados.

1

Porte Sistemas

5.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O Capítulo 5 teve como objetivo a apresentação da interface computacional do software, ressaltando portanto, as características de fácil aplicabilidade no âmbito industrial. As características do software, altamente amigável com o usuário, permitem a adaptação do mesmo à obtenção de novas variáveis, o que é altamente desejável do ponto de vista operacional. A adoção da Linguagem Object Pascal na construção do algoritmo, portanto, pôde conferir ao programa grande flexibilidade para a expansão à novos objetivos, como cálculo de custos de transporte e movimentação de materiais. No próximo capítulo, será feita a aplicação do software para alguns arranjos pesquisados.

CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DE RESULTADOS

O propósito básico da pesquisa, inicialmente, orientou-se à implementação da metodologia de formação de famílias de peças e células de máquinas no âmbito industrial, o que torna todo o trabalho passível de uma avaliação empresarial. Entretanto, as características que um arranjo fabril deve possuir para permitir a implementação de um software desta natureza são peculiares, identificando empresas que desejam evoluir em sua gestão administrativa, possuem estrutura suficiente para comportar um modelo de autogerenciamento e que possuem um mix de produção compatível com a adaptação de layout em grupo. Especificamente em Santa Catarina, existem muitas empresas que estão em ritmo de mudanças neste sentido. Porém, a divulgação de trabalhos desta natureza, como acontece no presente caso encontra empecilhos com os próprios gerentes e diretores, dificultando a coleta de dados e aplicação da metodologia.

Como forma de contornar o problema, algumas metodologias recentes na solução de problemas de formação de famílias e células de máquinas (Su, 1998; Kamal, 1996) foram pesquisadas e, através de exemplos de roteiros de fabricação, foram comparadas o método Branch and Bound proposto. O propósito básico será a avaliação da metodologia do ponto de vista de eficiência na formação de agrupamentos, considerando a característica de duplicação das máquinas-gargalo.

Antes de apresentar os exemplos, será feita uma descrição de alguns índices de desempenho computacional de algoritmos, o que os tornam passíveis de uma avaliação do ponto de vista de eficiência na formação de agrupamentos.

6.1 ÍNDICES DE DESEMPENHO DO MODELO EMPREGADO E DE OUTRAS METODOLOGIAS

A fim de estabelecer critérios que quantifiquem a eficiência e o desempenho do modelo empregado nesta pesquisa, alguns índices de desempenho foram estudados por autores (Chu, 1990), revelando pontos fortes e deficiências das várias metodologias. O estabelecimento de parâmetros operacionais em algoritmos de formação de famílias de peças e células de máquinas é importante na otimização de fatores de produtividade, tais como lead-times e WIP. A figura 6.1 mostra basicamente quais são estes índices de desempenho, que podem estabelecer um comparativo entre os vários métodos. Nestes critérios, serão apenas avaliados a eficiência matemática e complexidade computacional para a formação de agrupamentos, não levando em consideração fatores, tais como custo de implementação.

Existe uma grande diversidade de algoritmos com as mais variadas metodologias, que evidentemente fornecem resultados muito diferentes, sob uma mesma massa de dados (Lorini, 1993). Os resultados são sempre uma combinação metodológica em si, associada à diferente critérios e limitações:

Será feito, portanto, um comparativo entre os principais métodos, considerando o grande número de metodologias existentes (Chu, 1990). Cabe ressaltar que a qualidade dos agrupamentos obtidos depende, além da metodologia empregada, da qualidade dos roteiros de produção, os quais devem ser o mais coerentes possíveis.

A figura 6.1 mostra as etapas para a estruturação de roteiros de fabricação, formação de famílias e avaliação segundo procedimentos operacionais. Evidentemente, cada configuração se traduzirá em custos finais de transporte de peças e sistemas de movimentação entre células, e dentro de uma célula. Para o problema específico de otimização de custos vários autores desenvolveram trabalhos na área, que podem ser conferidos na literatura especializada (Su, 1998).

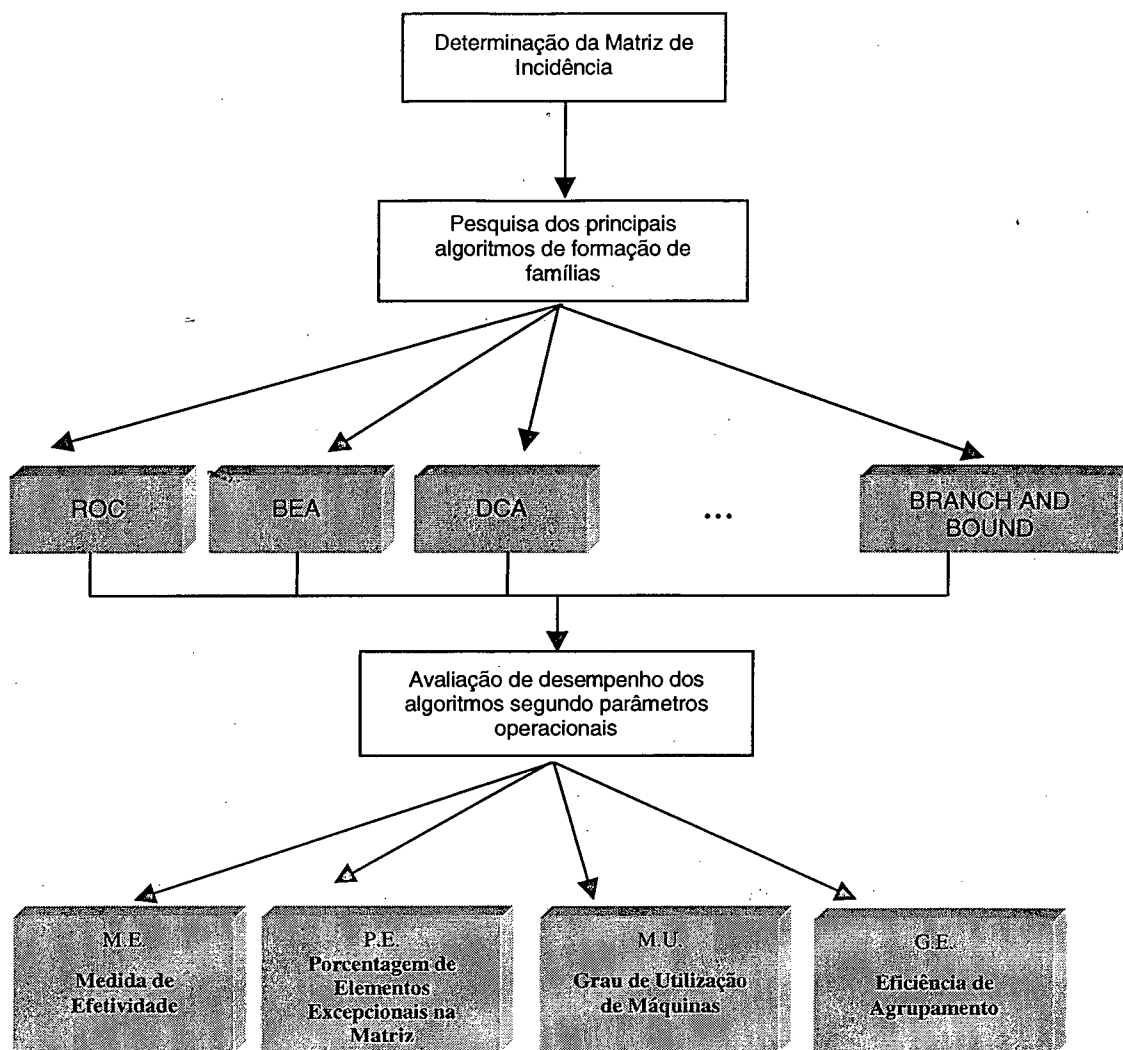


Figura 6.1: Índices de desempenho

Medidas de desempenho de agrupamentos podem ser calculadas de acordo com a eficiência computacional ou com efetividade de agrupamentos. A efetividade de agrupamentos é feita normalmente em termos do tempo de execução do programa, quantidade de memória necessária e a complexidade computacional requerida ao algoritmo.

De acordo com Chu (1990), quatro medidas de efetividade podem ser selecionadas para a avaliação de agrupamentos.

- *Energias Totais de Ligação*, também chamada de Medida de Efetividade (**M.E.**), que avalia o número de ligações naturais entre células positivas na matriz de incidência. Teoricamente, a matriz com aglomeramentos mais densos de elementos resultará em maior medida de efetividade; portanto, uma maior **M.E.** que o algoritmo pode criar resultará em melhores resultados para o agrupamento.
- *Porcentagem de Elementos Excepcionais (P.E.)*, que pode servir de índice de qualidade para a diagonalização da matriz de incidência, calculando-se o número de partes/máquinas presentes fora dos blocos diagonalizados. O percentual é obtido dividindo-se o número de elementos excepcionais pelo total de elementos positivos da matriz de incidência. Assim, uma menor porcentagem de elementos excepcionais indicará um melhor arranjo da matriz de incidência.
- *Razão de Utilização de Máquinas (Machine Utilisation - M.U.)*, indicando a porcentagem de vezes em que as máquinas dentro dos agrupamentos são utilizadas na produção. O **M.U.** pode ser calculado pela equação 6.1:

$$MU = \frac{N_1}{\sum_{k=1}^K m_k n_k} \quad (6.1)$$

onde N_1 é o número total de 1's em cada agrupamento, K é o número de agrupamentos, m_k é o número de máquinas no k -ésimo agrupamento, e n_k é o número de partes no k -ésimo agrupamento. Quanto maior o valor de **M.U.**, tanto melhor as máquinas estão sendo utilizadas no arranjo.

- *Eficiência de Agrupamento (Group Efficiency – G.E.)* é uma medida agregada que leva em consideração o número de elementos excepcionais e a *M.U.* do agrupamento. Um peso ρ é considerado com o objetivo de ponderar a importância relativa de cada termo. Normalmente, um valor de 0.5 é usado. A GE pode ser definida pela equação (6.2):

$$GE = \rho \frac{N1}{\sum_{K=1}^K m.n_k} + (1-\rho) \left(1 - \frac{NE}{MN - \sum_{K=1}^K m.n_k}\right) \quad (6.2)$$

onde MN é o tamanho da matriz de incidência e NE é o número de elementos excepcionais.

6.2 EXEMPLO ILUSTRATIVO

Nesta seção, serão apresentados dois exemplos ilustrativos com o propósito de fornecer uma análise comparativa entre a metodologia Branch and Bound e outras metodologias, segundo os critérios apresentados no item 6.1. Nos exemplos apresentados a seguir, será analisada a eficiência de agrupamentos da metodologia.

6.2.1 Exemplo 1

A tabela 6.1 apresenta uma lista de informações sobre um determinado arranjo fabril, contendo roteiros, tempos de operação das peças nas máquinas, e tempos de setup, extraído de Su (1998). Neste exemplo, o autor aplica a metodologia Multi-Objetiva através do processo de Recozimento Simulado (Simulated Annealing – SA) na formação de células. As informações contidas na segunda, terceira e quarta coluna estão correlacionados de acordo com a ordem dos dígitos colocados. A tabela 6.2 apresenta o tempo disponível nas máquinas. Nas tabelas 6.1 e 6.2, os tempos apresentam-se em horas.

Tabela 6.1: Roteiros de fabricação, tempos de execução das peças nas máquinas e tempos de setup

Peça	Seqüência de Operação	Tempo de execução	Tempos de Setup
1	2, 4, 12,2, 13, 10	1, 4, 2, 4, 5, 3	0.2, 0.3, 0.1, 0.2, 0.3
2	14, 7, 17, 15, 13	2, 2, 3, 2, 3	0.3, 0.1, 0.3, 0.2, 0.3
3	18, 10, 8, 16, 3	1, 1, 1, 2, 3	0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.1
4	15, 1, 5, 11	2, 2, 4, 2	0.3, 0.2, 0.3, 0.2
5	15, 9, 6	5, 2, 2	0.4, 0.2, 0.3
6	9, 15, 10, 15	5, 2, 2, 2	0.3, 0.2, 0.3, 0.1
7	10, 3, 16	1, 2, 3	0.2, 0.1, 0.2
8	16, 10, 3, 18, 10	3, 1, 3, 2, 2	0.2, 0.1, 0.1, 0.1, 0.2
9	12, 10, 15, 4, 6, 10	1, 1, 2, 3, 1, 2	0.1, 0.3, 0.1, 0.2, 0.2, 0.2
10	13, 2, 12, 6, 2	1, 2, 3, 2, 2	0.1, 0.1, 0.2, 0.2, 0.1
11	6, 2, 4, 13, 6	1, 1, 3, 3, 3	0.2, 0.1, 0.2, 0.2, 0.3, 0.2
12	4, 2, 6, 12, 7, 13	1, 3, 3, 3, 2, 3	0.1, 0.3, 0.5, 0.4, 0.1, 0.1
13	15, 7, 17, 7, 14	3, 2, 3, 3, 1	0.1, 0.2, 0.1, 0.2, 0.1
14	10, 18, 8, 18, 3, 16	1, 2, 3, 3, 4, 4	0.3, 0.2, 0.2, 0.1, 0.2, 0.2
15	8, 18, 16, 10	1, 2, 3, 2	0.1, 0.3, 0.2, 0.2
16	5, 11, 1, 5, 15	1, 4, 2, 1, 2	0.1, 0.2, 0.2, 0.1, 0.2
17	11, 1, 15, 5, 15	2, 2, 1, 5, 1	0.1, 0.3, 0.1, 0.3, 0.2
18	15, 9, 6, 9	4, 2, 2, 3	0.3, 0.2, 0.3, 0.1
19	15, 5, 11, 1	2, 3, 2, 1	0.2, 0.3, 0.2, 0.1
20	8, 16, 8, 18	1, 2, 2, 2	0.2, 0.2, 0.2, 0.2
21	6, 10, 15, 9, 10	3, 1, 1, 3, 2	0.4, 0.2, 0.1, 0.2, 0.2
22	7, 14, 13, 15, 14, 3	2, 2, 5, 2, 4, 4	0.2, 0.2, 0.3, 0.2, 0.1, 0.3
23	6, 4, 2, 12, 2, 13	1, 1, 3, 4, 1, 2	0.2, 0.1, 0.1, 0.3, 0.1, 0.3
24	12, 4, 10, 6, 13, 4	2, 1, 2, 2, 2, 2	0.3, 0.1, 0.3, 0.4, 0.1, 0.1
25	3, 7, 3, 17, 13	5, 3, 4, 3, 4	0.3, 0.3, 0.1, 0.3, 0.2
26	7, 14, 3, 17, 13,7	1, 3, 3, 2, 4, 1	0.1, 0.2, 0.3, 0.1, 0.5, 0.1
27	3, 15, 8, 18, 16, 8	2, 1, 4, 2, 4, 1	0.2, 0.1, 0.2, 0.1, 0.3, 0.1
28	11, 1, 15, 1	3, 2, 1, 3	0.2, 0.2, 0.1, 0.2
29	1, 15, 1, 11	2, 1, 5, 1	0.2, 0.2, 0.1, 0.1
30	10, 6, 15, 9, 17	3, 1, 1, 2, 2	0.3, 0.1, 0.1, 0.1, 0.3
31	15, 10, 9, 18, 6	4, 2, 3, 3, 1	0.3, 0.3, 0.3, 0.1, 0.1
32	18, 10, 3, 10, 8, 16	1, 2, 2, 2, 3, 1	0.1, 0.1, 0.3, 0.1, 0.3, 0.1
33	17, 13, 15, 7, 14, 7	1, 2, 1, 3, 2	0.2, 0.2, 0.4, 0.2, 0.2, 0.1
34	2, 13, 4, 12, 10	3, 1, 4, 1, 3	0.3, 0.1, 0.4, 0.1, 0.4
35	14, 17, 7, 3, 17, 15	1, 2, 3, 2, 2, 1	0.1, 0.2, 0.4, 0.3, 0.1, 0.3

Fonte: Su (1998)

Tabela 6.2: Relação de tempos disponíveis nas máquinas

Máquina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Tempo disponível	25	24	22	25	22	22	26	26	25	22	22	22	22	20	25	25	28	27

Fonte: Su (1998)

De acordo com os roteiros de fabricação apresentados na tabela 6.1, é possível construir a matriz de incidência, apresentada na figura 6.2.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	P32	P33	P34	P35	
M1				1												1	1		1										1	1						
M2	1									1	1	1											1												1	
M3			1				1	1						1								1				1	1	1				1				1
M4	1								1		1	1											1	1											1	
M5				1												1	1		1																	
M6					1				1	1	1	1						1			1		1	1							1	1				
M7		1											1	1								1				1	1							1		1
M8			1												1	1					1							1				1				
M9					1	1												1			1										1	1				
M10	1		1			1	1	1	1					1	1						1			1							1	1	1		1	
M11				1												1	1		1										1	1						
M12	1								1	1		1											1	1											1	
M13	1	1								1	1	1										1	1	1	1	1								1	1	
M14		1											1									1				1							1		1	
M15		1		1	1	1							1			1	1	1	1		1	1					1	1	1	1	1		1		1	
M16			1				1	1	1					1	1					1								1				1				
M17		1											1													1	1				1			1		1
M18			1					1						1	1					1									1			1	1			

Figura 6.2: Matriz de Incidência para o Exemplo 1 (Su, 1998)

A figura 6.3 mostra o layout básico para o arranjo segundo a metodologia proposta por Su (1998), onde o número total de células é 5 e o número total de máquinas em cada células varia de 4 à 6. Para este arranjo, a composição de máquinas para cada célula é mostrada na figura 6.4.

	P 5	P 6	P 18	P 21	P 30	P 31	P 2	P 13	P 22	P 25	P 26	P 33	P 35	P 3	P 7	P 8	P 14	P 15	P 20	P 27	P 32	P 4	P 16	P 17	P 19	P 28	P 29	P 1	P 9	P 10	P 11	P 12	P 23	P 24	P 34	
M6	1	1	1	1	1	1																														
M9	1	1	1	1	1	1																														
M10	1	1	1	1	1	1																														
M15	1	1	1	1	1	1																														
M3							1	1	1	1	1	1	1							1																
M7							1	1	1	1	1	1	1																					1		
M13							1	1	1	1	1	1	1																					1		
M14							1	1	1	1	1	1	1																							
M15							1	1	1	1	1	1	1							1																
M17				1			1	1			1	1	1	1																						
M3														1	1	1	1	1	1	1																
M8														1	1	1	1	1	1	1																
M10														1	1	1	1	1	1	1																
M16														1	1	1	1	1	1	1																
M18														1	1	1	1	1	1	1																
M1																								1	1	1	1	1	1							
M5																							1	1	1	1	1	1								
M11																							1	1	1	1	1	1								
M15																							1	1	1	1	1	1								
M2																													1							
M4																														1						
M6																															1					
M10																																1				
M12																																	1			
M13																																		1		

Figura 6.3: Matriz ordenada para o Exemplo 1 segundo a metodologia S.A. (Fonte: Su, 1998)

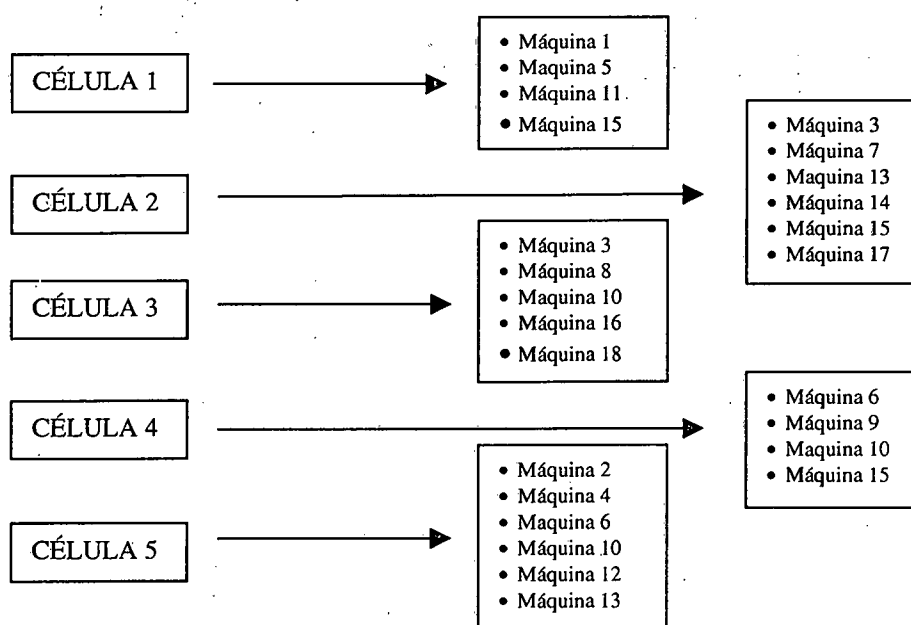


Figura 6.4: Arranjo das células para o layout fabril para o Exemplo 1 segundo a metodologia S. A.(Fonte: Su, 1998)

O procedimento de formação de famílias de peças segundo o método Branch and Bound foi aplicado à matriz de incidência do exemplo proposto, cujos agrupamentos podem ser visualizados na figura 6.5, e os arranjos de máquinas para o mesmo exemplo se encontram na figura 6.6. Para a solução encontrada, foi considerado o fator de agrupamento $\beta = 0,83$.

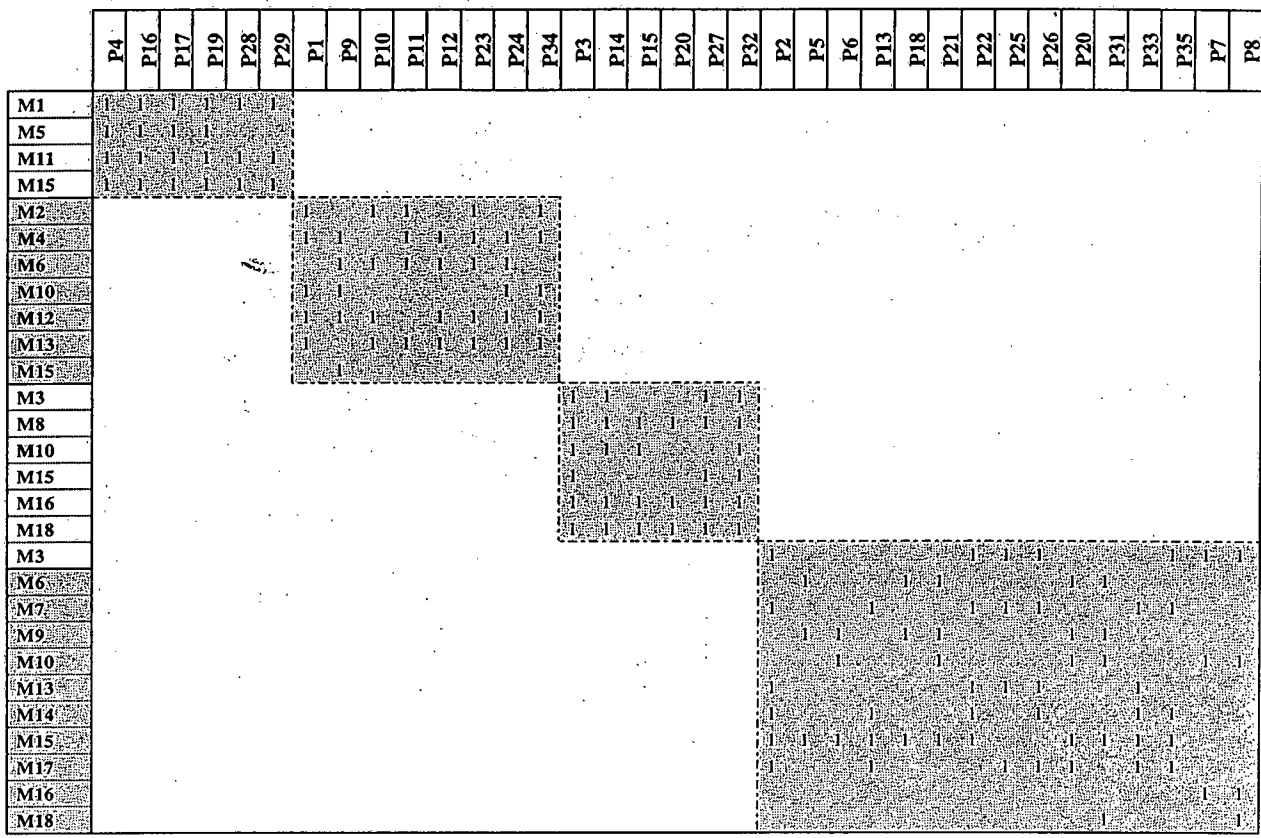


Figura 6.5. Matriz ordenada para o Exemplo 1 segundo o método Branch and Bound

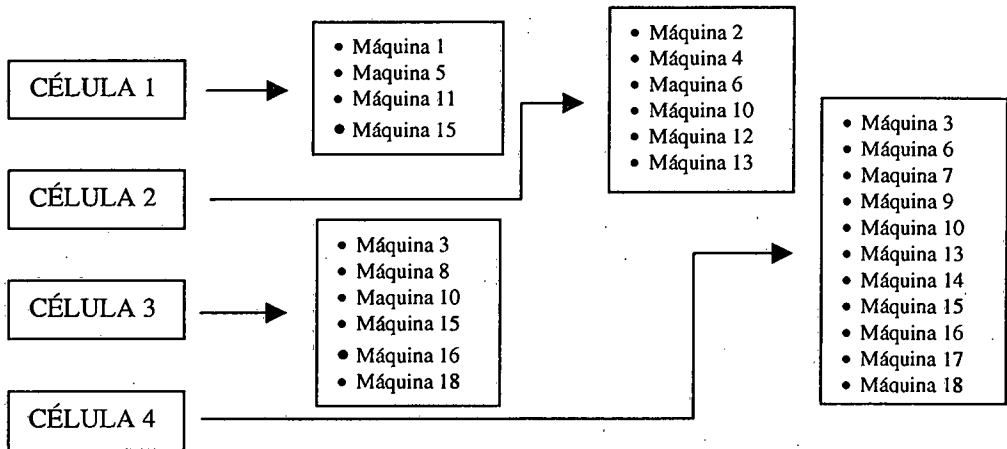


Figura 6.6: Arranjo para o layout fabril do Exemplo 1- S. A segundo o método Branch and Bound

6.2.2 Exemplo 2

O Exemplo 2, extraído de Kamal (1996) e modificado para a apresentação dos roteiros de fabricação é primeiramente submetido ao método FACT (Kamal, 1996), o qual é passível de armazenar dados de tempos de processamento na matriz de incidência. Como o exemplo proposto pelo autor não dispunha de entradas para tempos de setup, quantidades de peças produzidas em cada máquina e tempo total disponível nas máquinas, arbitrou-se 1 unidade para os valores q_{ij} (quantidades produzidas de cada peça em cada máquina), zero para as entradas de tempos de setup, e 10 unidades de tempo para as entradas de tempos disponíveis nas máquinas. Com estes dados, o software é capaz de realizar tão somente o balanceamento das máquinas-gargalo, não levando em consideração a capacidade de duplicação de máquinas com I_j menor que AW_j (tempo total disponível), o que não invalida o programa. A figura 6.7 apresenta a matriz de incidência, ocultando o valor dos tempos de processamento apresentados no trabalho de Kamal.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24
M1				1		1	1																	
M2			1																					
M3			1	1																	1			
M4	1	1															1		1	1			1	
M5	1	1															1			1			1	
M6									1	1	1	1		1	1	1						1		
M7	1	1					1										1			1				
M8					1				1	1		1	1	1	1	1						1		
M9					1				1															
M10			1																					1
M11			1	1																	1			1
M12							1	1																
M13						1	1	1										1					1	
M14									1		1		1		1									

Figura 6.7: Matriz de incidência para o exemplo 2 (Kamal, 1996)

A figura 6.8 apresenta a matriz ordenada de acordo com o método FACT. Observa-se que o método executa a diagonalização de forma eficiente, embora apresente vários elementos excepcionais em sua estrutura, aumentando a movimentação e transporte de peças. Os arranjos de células para o mesmo exemplo se encontram na figura 6.9.

	P6	P8	P18	P3	P4	P21	P24	P1	P2	P7	P17	P19	P20	P23	P5	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P22
M1	1									1														
M12		1								1														
M13	1	1	1							1				1										
M2				1	1																			
M3				1	1	1																		
M10				1			1																	
M11				1	1	1	1																	
M4								1	1		1	1	1	1										
M5								1	1		1		1	1										
M7								1	1	1	1		1											
M6																1	1	1	1		1	1	1	1
M8																1	1	1		1	1	1	1	1
M9																1	1					1		
M14																1		1		1		1		

Figura 6.8: Matriz ordenada para o exemplo 2 segundo método FACT (Fonte: Kamal, 1996)

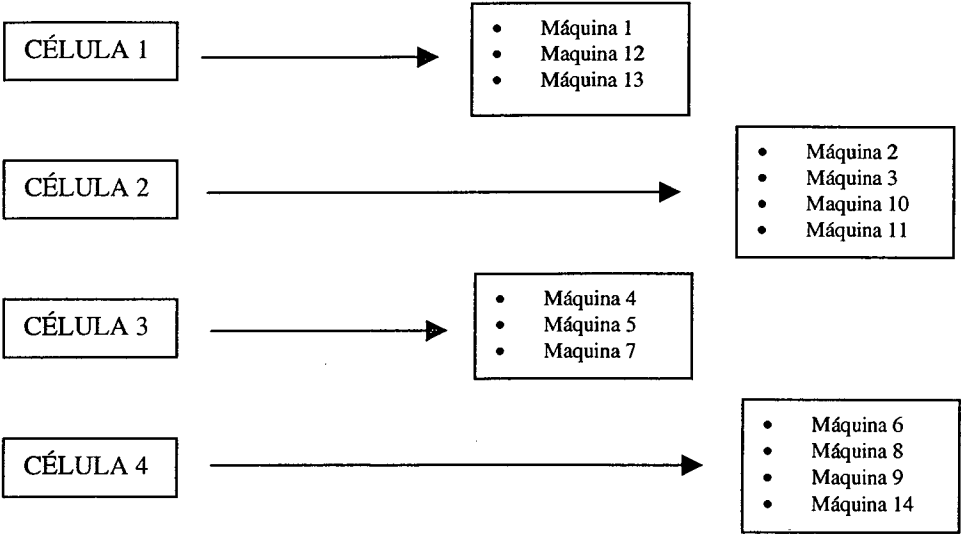


Figura 6.9: Arranjo das células para o layout fabril do exemplo 2 segundo o método FACT

Os dados propostos por Kamal foram utilizados para aplicação no método Branch and Bound, e a solução é mostrada na matriz da figura 6.10. Na figura 6.11 é mostrado o arranjo de células segundo o método Branch and Bound para o exemplo 2. Para a solução encontrada, foi considerado o fator de agrupamento $\beta = 1$.

	P3	P4	P6	P7	P8	P21	P24	P5	P9	P11	P13	P15	P1	P2	P17	P20	P23	P18	P19	P10	P12	P14	P16	P22
M1	1	1	1	1	1	1	1																	
M2	1	1	1	1	1	1	1																	
M3	1	1	1	1	1	1	1																	
M7	1	1	1	1	1	1	1																	
M10	1	1	1	1	1	1	1																	
M11	1	1	1	1	1	1	1																	
M12	1	1	1	1	1	1	1																	
M13	1	1	1	1	1	1	1																	
M6								1	1	1	1	1	1											
M8								1	1	1	1	1	1											
M9								1	1	1	1	1	1											
M14								1	1	1	1	1	1											
M4													1	1	1	1	1	1						
M5													1	1	1	1	1	1						
M7													1	1	1	1	1	1						
M13																		1						
M13																			1					
M4																				1				
M6																					1	1	1	1
M8																					1	1	1	1

Figura 6.10: Arranjo das células para o layout fabril do exemplo 2 segundo o método Branch and Bound

De acordo com os dois exemplos citados acima, pode-se constatar que o método Branch and Bound não permite que existam elementos excepcionais na solução final, uma vez que as máquinas-gargalo definidas pela parâmetro β foram duplicadas quantas vezes fossem necessárias à completa diagonalização da matriz. Esta propriedade é observada em todas as soluções encontradas, o que contribui para a eficiência na movimentação de peças

dentro do layout fabril. Entretanto, como pode-se observar na figura 6.5 e 6.10, o número de máquinas necessárias ao arranjo-solução é maior, o que implica em maiores custos de investimento para a empresa.

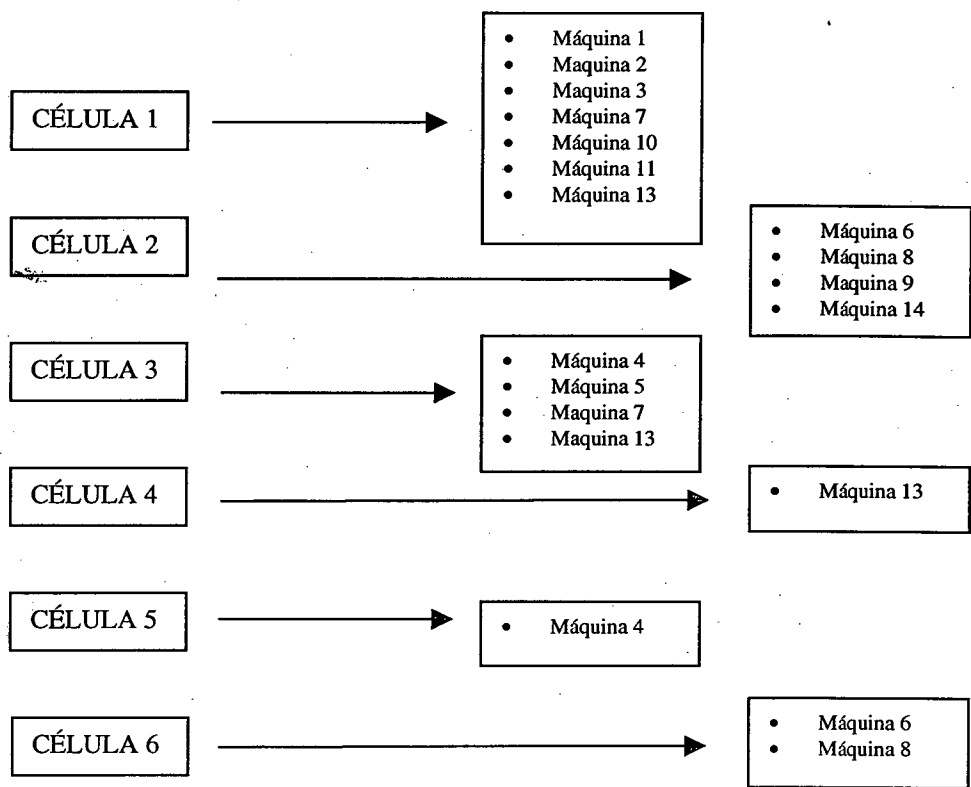


Figura 6.11: Arranjo das células para o layout fabril do exemplo 2 segundo o método Branch and Bound

Os resultados para cada método são mostrados nas tabelas 6.3 e 6.4.

Tabela 6.3: Resultados de Desempenho para o Exemplo 1

MÉTODO	TAMANHO	Nº AGRUP.	1-PE(%)	M.U.(%)	GE(%)	ME(%)
ROC	18x 35	4	63.58	62.00	75.23	90.65
BEA	18x 35	4	63.58	62.00	75.23	100.00
DCA	18x 35	2	90.70	30.44	61.33	83.18
BRANCH AND BOUND	18x 35	4	100.00	53.70	76.12	89.90
FACT	18x 35	-	-	-	-	-
S A	18x 35	5	95.33	76.75	87.50	89.51

Tabela 6.4: Resultados de Desempenho para o Exemplo 2

MÉTODO	TAMANHO	Nº AGRUP.	1-PE(%)	M.U.(%)	GE(%)	ME(%)
ROC	14x 24	4	71.19	48.80	71.00	100.00
BEA	14x 24	4	71.19	48.80	71.00	100.00
DCA	14x 24	3	71.19	44.20	68.57	52.17
BRANCH AND BOUND	14x 24	6	100.00	63.94	81.97	100.00
FACT	14x 24	4	93.3	65.11	81.77	80.56
SA	14x 24	-	-	-	-	-

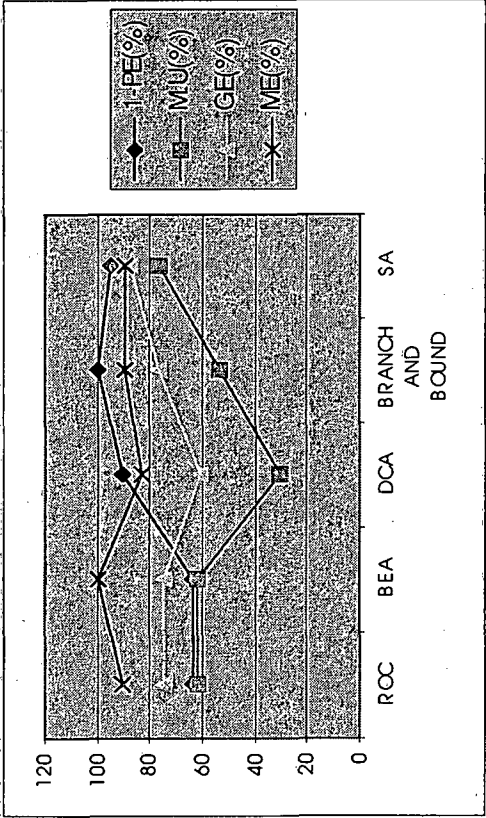


Fig. 6.12a: Avaliação para o Exemplo 1

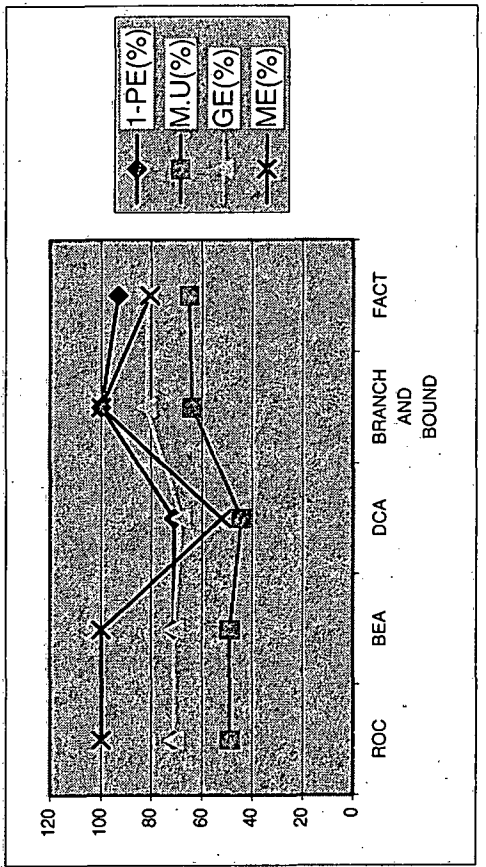


Fig. 6.12b: Avaliação para o Exemplo 2

Figura 6.12: Avaliação de agrupamentos segundo parâmetros operacionais

6.2.3 Considerações sobre os resultados obtidos

Observando os resultados encontrados na figura 6.12, o método Branch and Bound apresenta características distintas em relação às demais metodologias. Estas características, expressas através de Índices de Desempenho, representam vantagens operacionais no ambiente de manufatura ocultas através de uma escala de valores, como foi afirmado no item 6.1. Portanto, deve-se interpretar o real significado dos valores expressos para chegar-se a uma conclusão alicerçada em termos de benefícios tangíveis (economia de custos e produtividade) e benefícios intangíveis (melhor satisfação dos trabalhadores).

6.2.3.1 Porcentagem de Elementos Excepcionais

Para melhor entender o real significado os valores expressos na figura 6.12, a ilustração de um modelo fabril fictício incorporando as características de arranjos de máquinas e famílias de peças é interessante na análise dos dois exemplos citados anteriormente, revelando diferenças significativas em termos das afirmações contidas no item 6.1.

Voltando-se à figura 6.12, observa-se que a característica de maior expressividade no método Branch and Bound é a *porcentagem de elementos excepcionais PE*, a qual representa o total de elementos excepcionais em relação ao total de elementos positivos presentes na matriz de incidência. Para uma matriz ordenada não apresentando elementos excepcionais, considera-se índice 100%. Para a compreensão de como a *porcentagem de elementos excepcionais* influi nos fluxos de produção, é importante a observação do roteiro de produção de uma determinada peça segundo as metodologias Simulated Annealing e Branch and Bound.

A figura 6.13 representará uma situação hipotética descrevendo, para o Exemplo 1, o fluxo de produção da peça nº 9 em um ambiente fabril organizado em células de manufatura. Para a peça nº 9, a seqüência de fabricação é: máquinas 12, 10, 15, 4, 6, 10.

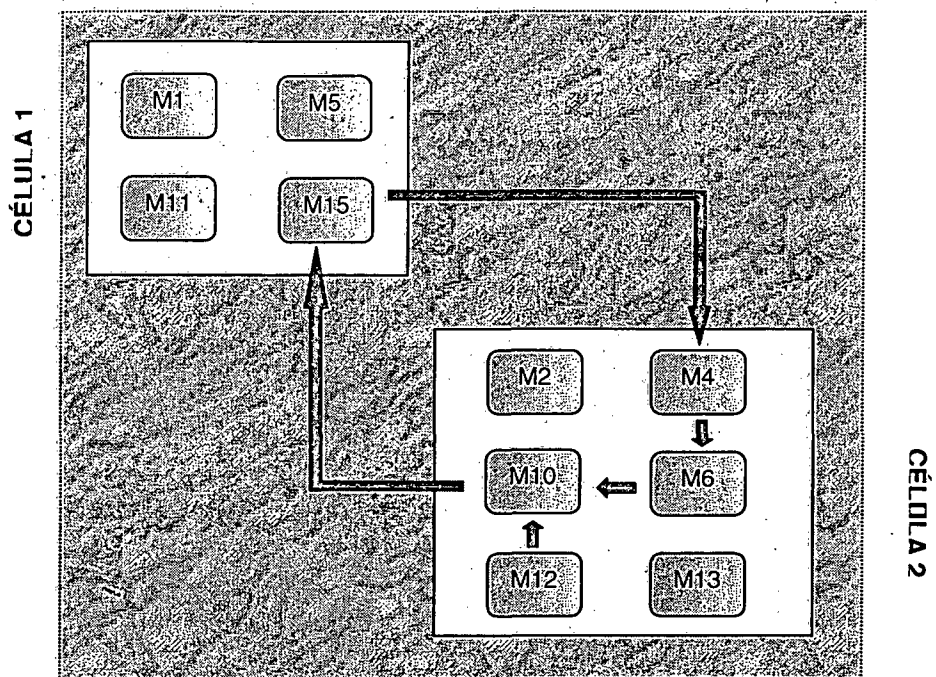


Figura 6.13: Deslocamento da peça processada à outra célula

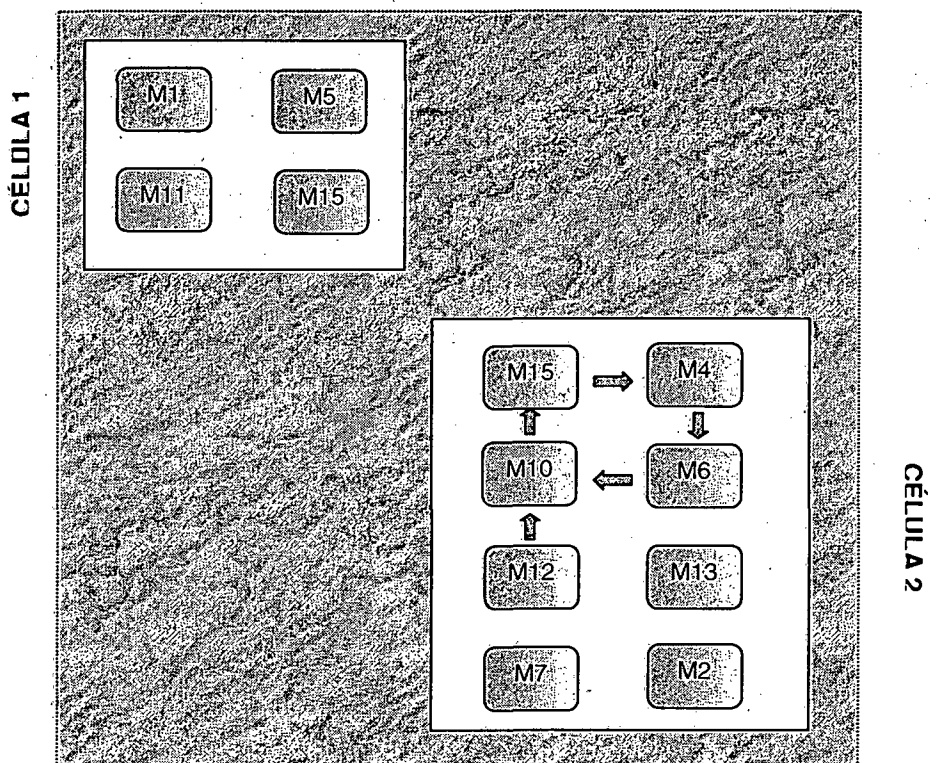


Figura 6.14: Redução de movimentos intercelulares

De acordo com a figura 6.13, a presença de um elemento excepcional causa excesso de movimentos intercelulares, originando custos de transporte, perda de tempo, riscos de danificação do material e conseqüente queda da produtividade. Logo, a alternativa da figura 6.14 sugere a presença de uma máquina na Célula 2, simplificando a movimentação e transporte de material. Apesar dos benefícios obtidos a longo prazo pela presença de máquinas adicionais no transporte e movimentação de materiais, convém observar a viabilidade da aquisição de novas máquina, considerando fatores como custo de aquisição, depreciação, manutenção.

A presença de elementos excepcionais é caracterizada nos modelos fabris de algumas empresas fabricantes de produtos em pequenos lotes, empresas as quais possuem um departamento específico para inspeção de lotes. Nessas empresas, estoques intermediários de produtos e elaboração devem realizar repetidas “viagens” ao departamento de inspeção, os quais voltam a seus respectivos setores de produção para serem processados e retornarem à inspeção. Estes deslocamentos desnecessários caracterizam um posto operativo externo ao roteiro ideal do fluxo de produção dos lotes, centralizando uma operação que poderia ser feita pelos próprios funcionários da produção. Voltando-se à figura 6.13, poderíamos imaginar a máquina M15 como sendo um posto para inspeção de lotes intermediários de produtos em elaboração. Estes lotes devem realizar repetidas viagens ao posto M15 a fim de executar-se a inspeção finda cada etapa do processo, como mostra a figura 6.15.

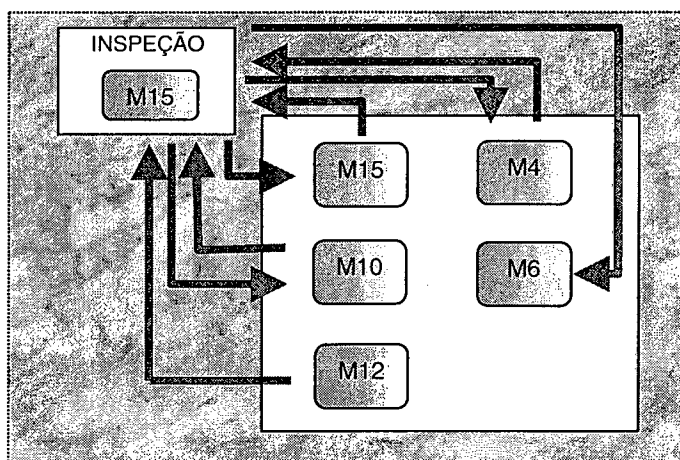


Figura 6.15: Processo de inspeção centralizada

O princípio de multifuncionalidade proposto pela filosofia de trabalho em célula propõe justamente que os próprios operários de uma célula de manufatura possam realizar o trabalho de inspeção de lotes *in loco*. Mais que eliminar um elemento excepcional e movimentos desnecessários dos lotes intermediários, não haveria mais um lugar definido apenas para a inspeção, deixando ao cargo dos funcionários esta tarefa, como mostra a figura 6.16.

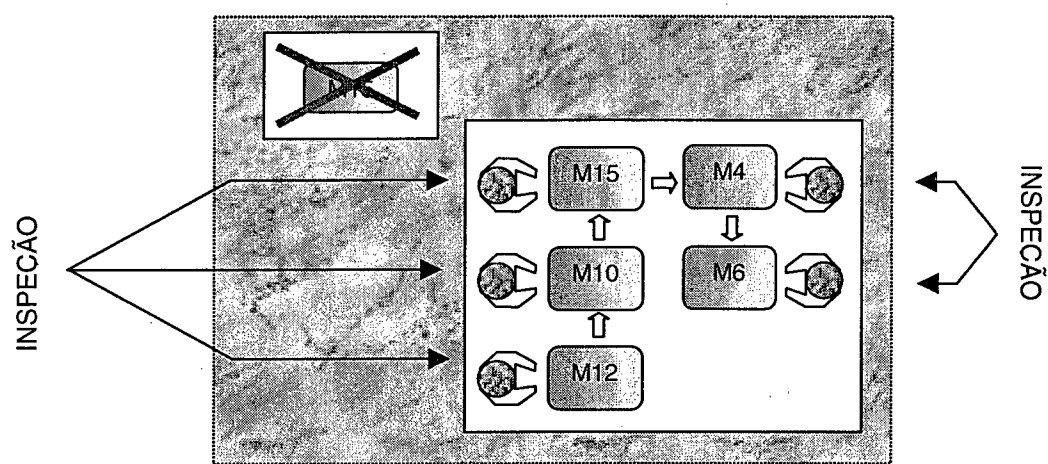


Figura 6.16: Descentralização do posto operativo e multifuncionalidade

6.2.3.2 Medida de Efetividade

Conforme descrito no Capítulo 3, item 3.1.6, a finalidade da Medida de Efetividade (**ME**) é maximizar a soma das ligações (equação 3.2), permutando-se todos os elementos positivos da matriz de incidência. Em outras palavras deseja-se encontrar:

$$\text{Max } \{ \text{ME(A)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=M} \sum_{j=1}^{j=N} a_{ij} [a_{i,j+1} + a_{i,j-1} + a_{i+1,j} + a_{i-1,j}] \}$$

onde a maximização leva em consideração todas as $N! M!$ combinações de vetores possíveis que podem ser encontrados pelas permutações de linhas e colunas. Este problema,

como indicado pela equação 3.2, é decomposto em dois subproblemas de otimização, um para as linha e outro para as colunas. Exemplificando o raciocínio proposto pela equação 3.2, analisar-se-á o Exemplo 2 sob a lógica de formação de células pela metodologia FACT. Observa-se na figura 6.8 que a matriz ordenada apresenta em sua primeira célula a seguinte disposição para o fluxo de peças:

	P6	P8	P18
M1	1		
M12		1	
M13	1	1	1

Figura 6.17: Ligações entre adjacências da Célula nº 1 da matriz ordenada do Exemplo 2 segundo o método FACT

Observando a figura 6.17, vê-se que cada elemento positivo da Célula 1 pode se relacionar com suas adjacências através dos elementos positivos vizinhos, tanto presente nas linhas como nas colunas.

Pode-se verificar, pois, que em um certo agrupamento, existirá um certo número de ligações verticais e horizontais representando dependências entre elementos. Na figura 6.17 observa-se 2 ligações horizontais e 1 ligação vertical, totalizando 3 ligações, ou M.E.=3.

Cada permutação de linhas e colunas dentro de uma mesma matriz de incidência contem um número de M.E que pode variar até o valor máximo obtido pelo método de agrupamento Bond Energy Analysis (desde que a matriz não sofra duplicações de máquinas). Logo, conclui-se que a matriz do Exemplo 1 e a matriz do Exemplo 2, ordenadas através do método BEA possuem 181 e 54 ligações, respectivamente, que podem ser consideradas como valores máximos.

Sob o ponto de vista funcional, cada ligação vertical corresponde à um par de máquinas operando adjacientemente, contribuindo para a formação de uma célula. As ligações horizontais vinculam-se ao índice de utilização das máquinas e eficiência de agrupamentos, sendo a falta delas indicativo de que nem todas as peças em uma célula são processadas pelas respectivas máquinas daquela célula. Esta relação, entre o número de ligações e o índice de utilização das máquinas, pode ser visualizada no gráfico da figura 6.12, onde as linhas representando as variáveis M.U., M.E. e G.E. evoluem de maneira tendenciosa entre os vários métodos.

Se for atribuído à matriz de incidência no seu estado original o valor mínimo de energias de ligação, pode-se construir uma escala de valores de zero a 100% (tabelas 6.3 e 6.4), considerando como condições de contorno os valores de ligações na matriz de incidência e nos agrupamentos obtidos pelo método BEA. Nos métodos Branch and Bound e Simulated Annealing ocorreu duplicação de máquinas, onde as escalas anteriormente calculadas necessitaram ter seus parâmetros alterados em função do número diferente de máquinas. Assim, obteve-se os valores mostrados nas tabelas 6.3 e 6.4 para as diversas configurações de matrizes presentes.

6.2.3.3 Eficiência de Agrupamentos e Índice de Utilização das Máquinas

As medidas de Índice de Utilização de Máquinas fornecem indicações de como as máquinas em um determinado arranjo estão sendo utilizadas efetivamente em relação ao período total de produção. Pode-se considerar como o período total de produção um turno, o período ao longo do qual vários eventos alheios ao regime de produção da máquina podem ocorrer. Estes eventos se compõem de paradas administrativas, paradas para treinamento, manutenção ou quedas de tensão, como mostra a figura 6.18.

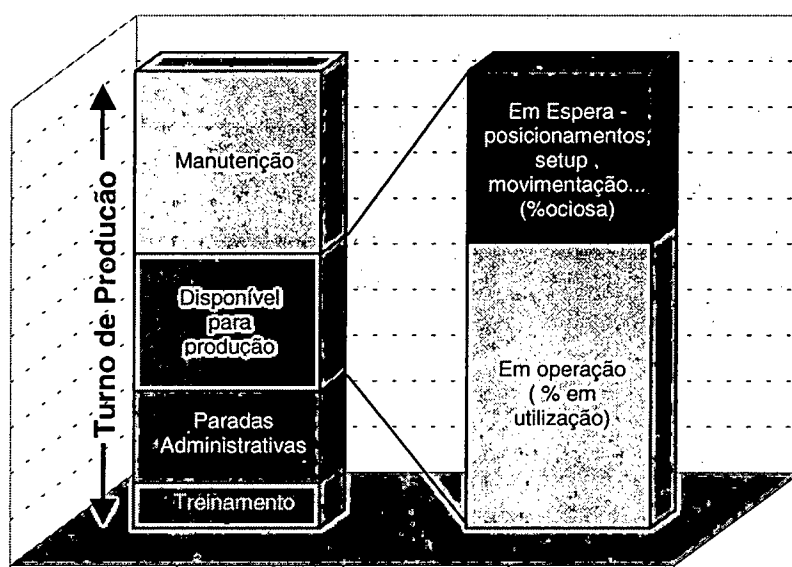


Figura 6.18: Distribuição de tempos de máquinas no regime de produção

Para melhor compreender a utilização da capacidade das máquinas em uma célula, observa-se os resultados apresentados nas tabelas 6.3 e 6.4. Através dos valores obtidos para o método Branch and Bound - 54% para o Exemplo 1 e 63% para o Exemplo 2 - constata-se que os mesmos estão muito aquém da capacidade de 100% para o regime de trabalho das máquinas, considerando a parcela de tempo disponível (fig. 6.18 *dir.*). Tendo

em vista estes valores, várias características de um regime de produção convencional devem ser levadas em consideração. Pode-se analisar os benefícios da duplicação de máquinas no aumento do índice de utilização de máquinas através da observação da movimentação de peças na figura 6.13. A excessiva movimentação de peças entre células faz parte do tempo disponível (fig. 6.18), sendo uma fonte de espera para as máquinas da Célula 2.

As capacidades de produção de quase todas as fábricas não podem ser 100% balanceadas. No método Branch and Bound, a duplicação de máquinas-gargalo contribuiu para o balanceamento parcial, refletindo em um acréscimo da utilização de máquinas em relação às metodologias tradicionais, conforme a figura 6.12b. Entretanto, em um layout fabril, máquinas diferentes possuem diferentes mecanismos de acionamento e velocidade e, diferentes tipos de peças necessitam, para cada operação, de tempos de máquinas diferentes. Outro fator restritivo leva em consideração a capacidade de carga das máquinas a longo prazo, onde é difícil prever a demanda futura. Como as cargas das máquinas compõe-se de diferentes cargas para diferentes produtos, realmente é difícil prever com exatidão cargas futuras.

Estas afirmações correspondem à maioria dos casos de regime de produção, embora raras exceções não relutam em estabelecer margens de produção próximas a plena capacidade. Estes casos se aplicam às empresas que investiram altas somas em equipamentos para fazer frente à competição, com limitadas margens de lucro. Entretanto, na maioria das operações industriais por todo o mundo podem ocorrer variações de demanda, sazonalidade e tendências globais de acréscimo e decréscimo.

Outro fator relevante nos resultados alcançados corresponde à eficiência de agrupamentos (*GE*) obtido. Como se observa na equação 6.2 a eficiência de agrupamentos está diretamente relacionada com o número de elementos excepcionais e com a razão de utilização das máquinas. Para uma melhor interpretação dos benefícios de uma melhor eficiência de agrupamento no fluxo de produção, deve-se analisar a simplificação no projeto de fábrica, delimitação de áreas próprias para a manufatura de uma família de peças e proximidade entre as máquinas minimizando tempos de setup. Portanto, conclui-se que para se chegar um desempenho global superior no ambiente fabril, algumas características foram sacrificadas em relação à outras, não invalidando o resultado geral da metodologia.

6.3 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O Capítulo 6 apresentou dois exemplos de roteiros de fabricação apresentando arranjos contendo 35 peças por 18 máquinas, e 24 peças por 14 máquinas, respectivamente. Assim, objetivou-se avaliar o presente algoritmo em relação a metodologias tradicionais de agrupamento de peças em famílias e máquinas em células, bem como por trabalhos envolvendo heurísticas. Os resultados foram apresentados segundo parâmetros operacionais que justificam a aplicação do presente trabalho em relação aos demais, conferindo benefícios no setor fabril, tais como flexibilidade e redução de tempos e movimentos.

CAPÍTULO 7– CONCLUSÕES FINAIS

Esta pesquisa buscou a elaboração de um sistema que auxilia na formação de famílias de peças e células de máquinas através da similaridade de roteiros de processamentos, especialmente no ambiente metal-mecânico. Procurou-se demonstrar através do algoritmo Branch and Bound a eficiência na formação de células de manufatura pela Tecnologia de Grupo, características que invariavelmente são exigidas para empresas que buscam otimizar seus arranjos fabris. A iniciativa de um trabalho desta natureza é relevante levantando aspectos tais como, por exemplo, utilização dos conceitos da Tecnologia de Grupo de uma maneira criteriosa e de forma a quem possa usufruir desta filosofia se convencer de sua real utilidade.

Os resultados da implantação TG em um ambiente fabril podem se traduzir em várias transformações dentro da empresa, como a exigência de informatização de dados e novas estruturas organizacionais. Em virtude destes pré-requisitos, é recomendável que se implemente a nova filosofia gradualmente, ou “passo-a-passo”, onde todos os colaboradores envolvidos possam aprender e incorporar os conceitos de maneira à total conscientização. Apesar do tempo ser consideravelmente maior, as pessoas terão um prazo maior para a aprendizagem, que pode-se traduzir como maiores períodos de treinamento, com dedicação exclusiva à grupos cada vez menores.

A decisão da adoção da metodologia apresentada no presente trabalho leva em consideração a possível aquisição de máquinas adicionais para a otimização dos movimentos e do fluxo de processamento dentro da célula, medida que, conforme já comentada, deve ser tomada com muito cuidado pelas gerências. No ramo metal-mecânico, os equipamentos para processamento de peças são onerosos, viabilizando o investimento se houver retorno a médio e a longo prazo através da redução de custos devido à melhora das condições de transporte e movimentação de materiais. Portanto, é de suma importância a análise de custos de investimento e retorno à médio e longo prazo na decisão de ordenar o fluxo fabril segundo a metodologia Branch and Bound.

Cabe ainda à organização decidir sob qual sistemática será feita a implementação, ou seja, utilizando recursos externos ou internos. Para grandes

corporações, a quantidade de colaboradores envolvidos é muito maior, uma maior quantidade e qualidade de recursos (treinamentos) é recomendável. Portanto, se há viabilidade de investimento, é uma boa opção a contratação de consultorias especializadas no ramo.

Espera-se, através do esforço deste trabalho, solidificar as vantagens da implantação de um ambiente de Tecnologia de Grupo, que entre outros benefícios contribui na redução de tempos e recursos.

7.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O campo de aplicação da Tecnologia de Grupo é extenso, e dá margem ao aprimoramento do trabalho presente em direção a diversos objetivos. A metodologia de formação de famílias de peças e células de máquinas pode ser direcionada aos mais diversos setores da indústria, sendo então de grande importância a extensão deste trabalho sobre outras áreas, não apenas no setor metal mecânico. Pode-se então buscar dentro das indústrias a reestruturação gradual dos processos produtivos através da implementação passo a passo da filosofia administrativa das chefias, como uma estratégia para a produtividade e competitividade.

A nível teórico, a análise de roteiros de produção oriunda deste trabalho pode ser estendida em direção à análise de movimentação de material dentro de uma célula e entre células. Tal como a análise de roteiros de tempos de produção, é essencial que o sistema de movimentação de materiais em um sistema fabril seja objeto de estudo. Neste sentido, trabalhos adicionais acrescentariam à metodologia presente o roteiro detalhado de como ocorrem as operações de transporte, armazenamento e posicionamentos. Por exemplo, em células de manufatura automatizadas, a sequência de operações começa quando um dispositivo automatizado de movimentação de materiais (robô) toma a peça à ser trabalhada e a posiciona na plataforma de execução. Após a finalização da operação, esta mesma peça pode ser requisitada na próxima estação de trabalho (de acordo com seu roteiro). Se a próxima máquina não estiver disponível, a peça é desviada para uma posição de espera (Work-in-progress - WIP) até houver a liberação. Estas operações de movimentação devem ser analisadas em termos

de espaço de movimentação, unidade de carga, área de armazenamento de WIP e restrições de tempo de execução da tarefa. Todas estas variáveis, juntamente com o sistema de movimentação de materiais precisam ser consideradas em um projeto de células de manufatura. Logo, a flexibilidade total da célula depende da escolha apropriada do melhor sistema de movimentação de materiais, cujo desempenho será melhorado se houver disponibilidade de um equipamento específico atender às tarefas em todas as células presente no sistema flexível, sem alterar o planejamento de produção.

Simultaneamente à estes objetivos, é de grande valia a incorporação ao presente trabalho de uma sub-rotina que forneça a análise de custos para cada simulação executada pelo algoritmo, traduzindo em termos monetários a redução de movimentação de peças dentro e entre células. Desta forma, a viabilidade econômica de implantação da nova filosofia seria mais facilmente analisada pelas gerências e chefes de produção.

7.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo dos conceitos de Tecnologia de Grupo comprovam que, através de muitos autores, os índices de produtividade em uma instalação fabril podem ser otimizados. O avanço tecnológico na automação industrial e a implementação de conceitos como CAPP e CAM realmente viabilizaram a rapidez de informações e a aplicação integrada da Tecnologia de Grupo como requisito para a eficiência e produção.

Contudo, deve-se salientar que a fórmula para o sucesso de implementação de uma nova filosofia nas empresas não depende apenas da formulação matemática para a organização de células. A decisão de uma empresa em adotar uma estrutura tal como apresentada nesta pesquisa deve levar em consideração a mudança no estilo de gerenciamento, na forma de os funcionários encararem o novo dinamismo e trabalho em equipe, mudanças na estrutura burocrática e no perfil dos próprios gerentes e chefes. As mudanças físicas que advirão da nova tecnologia afetarão supervisores, a estrutura de

suporte, o trabalho dos funcionários, manutenção, engenharia planejamento e controle de produção, compras, ou seja, a empresa como um todo.

Em suma, o conceito de TG invariavelmente revelar-se-á multi-facetado diante da mão-de-obra. Poderá ser encarada como benefício para alguns, onde a polivalência e o dinamismo agora tomarão parte do dia a dia, ou um empecilho para outros, onde o conservadorismo e os antigos conceitos ainda reinam. A natural resistência do homem à mudanças de estilos organizacionais pode se apresentar sob diferentes formas, atenuadas mais ainda quando os resultados práticos demoram a se evidenciar. Cabe concluir, então, que o sucesso de aplicação não dependerá apenas da tecnologia, mas da habilidade dos gerentes e chefes em integrar todos os setores da empresa, otimizando a comunicação e a coordenação interdepartamental. Algumas questões poderão surgir:

- (a) Quais fatores são críticos e quais os fatores não críticos para o sucesso de implementação?
- (b) Em particular, quais as regras para a estratégia de operação, educação, treinamento?
- (c) Como podemos definir o sucesso e o fracasso da implementação dos conceitos de TG?
- (d) Qual o grau de classificação de tarefas, estruturas de recompensa, seleção de pessoal é necessário para a implementação?
- (e) Qual o impacto da TG sobre os aspectos sociais e sobre a própria efetividade do sistema?

Conclui-se que todo o processo de implementação requer um estudo minucioso e detalhado, principalmente na área interdisciplinar, o qual sem dúvida resultará em grande auxílio no sucesso da aplicação da TG. Portanto será necessário, devido ao caráter inovador e organizacional, treinamento realizado por indivíduos com larga experiência em aspectos comportamentais, técnicas gerenciais, engenharia e organização industrial. Base teórica já existe no campo da Tecnologia de Grupo e

Organização da Manufatura. Cabe ainda aos meio de pesquisa a divulgação e implementação nas diversas áreas da economia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADIL G. K.; RAJAMANI D.; STRONG D. **Cell formation considering alternate routings.** *International Journal of Production and Research*, V. 34, nº5, pp 1361-1380, 1996.
2. BLACK, J. T. **O projeto da fábrica com futuro.** *Bookman*, 1998.
3. BEZERRA, J. C. **Simplesmente Just in Time.** *IMAN*, 1990.
4. BOE, J.W., CHENG, C.H.. **A close neighbor algorithm for designing cellular manufacturing systems.** *International Journal of Production and Research*, V. 29, nº10, pp 2097-2116, 1991.
5. BURBIDGE, J. L. **Operation schedule with GT and PBC.** *International Journal of Production and Research*, V. 26, pp 424-442, 1988.
6. BURBIDGE, J. L. **Planejamento e Controle de Produção.** *Editora Atlas*.1981.
7. CARRIE, A. S. **Numerical taxonomy applied to Group Technology and plant layout.** *International Journal of Production and Research*, V. 11, pp 399-416, 1973.
8. CHAN, H. N.; MILNER, D. A. **Direct Clustering Analysis for Group formation in Cellular Manufacture.** *Journal of Production Research*, V. 1, pp 65-75, 1973.
9. CHANDRASEKHARAN, M. P.; RAJAGOPALAN, R. **An ideal seed non-hierarchical clustering algorithm for cellular manufacturing.** *International Journal of Production and Research*, V. 24, nº2, pp 451-464, 1986
10. CHANDRASEKHARAN, M. P.; RAJAGOPALAN, R. **ZODIAC – An Algorithm for concurrent formation of part-families and machine-cells.** *International Journal of Production and Research*, V. 25, nº6, pp 835-850, 1987.

11. CHENG, C. H.. Algorithms for Grouping Machine Groups in Group Technology. *Omega*, V. 20, n°4, pp 493-501, 1992.
12. CHENG, C. H.; MADAN, M. S.; MOTWANI, J. Designing Cellular Manufacturing Systems by a Truncated Tree Search. *International Journal of Production and Research*, V. 34, n°2, pp 349-361, 1996.
13. CHU, C.H.; TSAI, M. A Comparison Of Three Array-Based Clustering Techniques For Manufacturing Cell Formation . *International Journal of Production and Research*, V. 28, n°8, pp 1147-1433, 1990.
14. COSTA.C. A. Metodologia para Implantação de Sistemas de Classificação e Codificação para Tecnologia de Grupo. *Dissertação de Mestrado – UFSC*. Florianópolis, 1992.
15. Células de Manufatura. *Controle de Qualidade*, pp 12-15, 1993.
16. De VRIES, M.; HARVEY S. M.; TIPNIS V. A. Group Technology: An overview and bibliography. *Manufacturing Systems Report*. Cincinnati, 1976.
17. De WITTE, J. The Use of Similarity Coefficients in Production Analysis. *International Journal of Production and Research*, V. 18, pp 271-277, 1986.
18. GONGAWARE, T. A.; HAM, I. Cluster Analysis Application for Group Technology manufacturing systems. *Manufacturing Engineering Transactions*, pp 503-508, 1981.
19. GUPTA, Y.; GUPTA, M.; KUMAR, A.; SUNDARAM, C.. A Genetic Algorithm-Based approach to cell composition and layout design problems. *International Journal of Production and Research*, V. 34, pp 447-482, 1996.

20. HAM, Inyong. **Group Technology**. *Handbook of Industrial Engineering*, Gavriel Salvendy (editor), John Wiley & Sons, 1982.
21. HARMON, R. L. **Reinventando a Fábrica**. Ed. Campus. RJ, 1991.
22. HARMON, R. L. **Reinventando a Fábrica II**. Ed. Campus. RJ, 1993.
23. KAMAL, S; BURKE, L.I: **A new neural network-based clustering algorithm for group technology**. *International Journal of Production and Research*, V. 34, nº4, pp 919-946, 1996.
24. KATTAN, I. A. **Design and Scheduling of Hybrid multi-cell flexible manufacturing system**. *International Journal of Production and Research*, V. 35, nº5, pp 1239-1257, 1997.
25. KATTAN, I. A. **Designing Flexible Manufacturing Cells using Branch and Bound method**. *International Journal of Production and Research*, V. 28, nº2, pp 323-336, 1990.
26. KING, J. R.. **Machine-component group formation in Group Technology**. *Omega*, V.8, pp 193-199, 1980.
27. KING, J. R.. **Machine-component grouping in production flow analysis: an approach using a rank order clustering algorithm**. *International Journal of Production and Research*, V. 18, nº2, pp 213-232, 1980.
28. KUSIAK, A. **The Generalized Group Technology Concept**. *International Journal of Production and Research*, V. 25, nº4, pp 561-569, 1987.
29. LORINI, F. J. **Aplicação da Tecnologia de Grupo na Organização de Ambientes de Manufatura**. *Dissertação de Mestrado – UFSC*. Florianópolis, 1991.
30. LORINI, F. J. **Tecnologia de Grupo e Organização da Manufatura**. *Editores da UFSC*. Florianópolis, 1993.

31. McAULEY, J. Machine grouping for efficient production. *The Production Engineer*, pp 53-57, 1972.
32. McCORMICK, W.T.; SCHWEITZER, P.J, WHITE, T.W. Problem Decomposition and Data Reorganization by a Clustering Technique. *Operations Research*, V. 20, nº5, pp 993-1009, 1972.
33. MONTEVECHI, J. A. B.. Tecnologia de Grupo Aplicada ao Projeto de Células de Fabricação. *Dissertação de Mestrado – UFSC*. Florianópolis, 1989.
34. MOSIER, C. T. An experiment investigating the application of clustering procedures and similarity coefficients to the GT machine cell formation problem. *International Journal of Production and Research*, V. 27, pp 1811-1835, 1989.
35. MOSIER, C. T.; TAUBE, L. The facets of Group Technology and Impacts on implementation – A State-of-the-Art Survey. *Omega*, V. 13, nº 5, pp 381-391, 1985.
36. MOURA, R. A. KANBAN – A simplicidade do controle de produção. *IMAN*. São Paulo, 1989.
37. PEREIRA, V. L. D. V. Aplicação do algoritmo genético na formação de células de manufatura. *Tese de Doutorado – UFSC*. Florianópolis, 1994
38. RAJAMANI D.; SINGH N.; ANEJA Y. P. Designing of Cellular Manufacturing Systems. *International Journal of Production and Research*, V. 34, nº7, pp 1917-1928, 1996.
39. SEIFODDINI, H. Machine-component group analysis versus the similarity coefficient method in cellular manufacturing applications. *Computers in Engng*, V. 18, nº3, pp 333-339, 1990.

40. SEIFODDINI, H.; WOLFE, P. M. **Application of the Similarity Coefficient in Group Technology.** *IIE Transactions*, V. 35, nº5, pp 1239-1257, 1997.
41. SHAFER, S.M.; ROGERS, D.F. **Similarity and distance measures for cellular manufacturing, Part I: a survey.** *International Journal of Production and Research*, V. 31, nº5, pp 1133-1142, 1993.
42. SHINGO, S. **O Sistema Toyota de Produção do ponto de vista da Engenharia de Produção.** *Bookman*. Porto Alegre, 1996
43. SU, C.T.; HSU, C.M. **Multi Objective machine-part cell formation through parallel simulated annealing.** *International Journal of Production and Research*, V. 36, nº8, pp 2185-207, 1998.
44. TARSUSLUGIL, M; BLOOR, J. **The use of similarity coefficients and cluster analysis in production flow analysis.** *Proceedings of the 20th International Machine Tool Design and Research Conference*, pp 525-531, 1979.
45. VANNELI, A.; KUMAR K. **A method for finding minimal bottle-neck cells for grouping part-machines families.** *International Journal of Production and Research*, V. 24, nº2, pp 387-400, 1986.
46. WEMMERLÖV, U.; HYER N. L. **Research issues in cellular manufacturing.** *International Journal of Production and Research*, V. 25, nº3, pp 413-431, 1987.